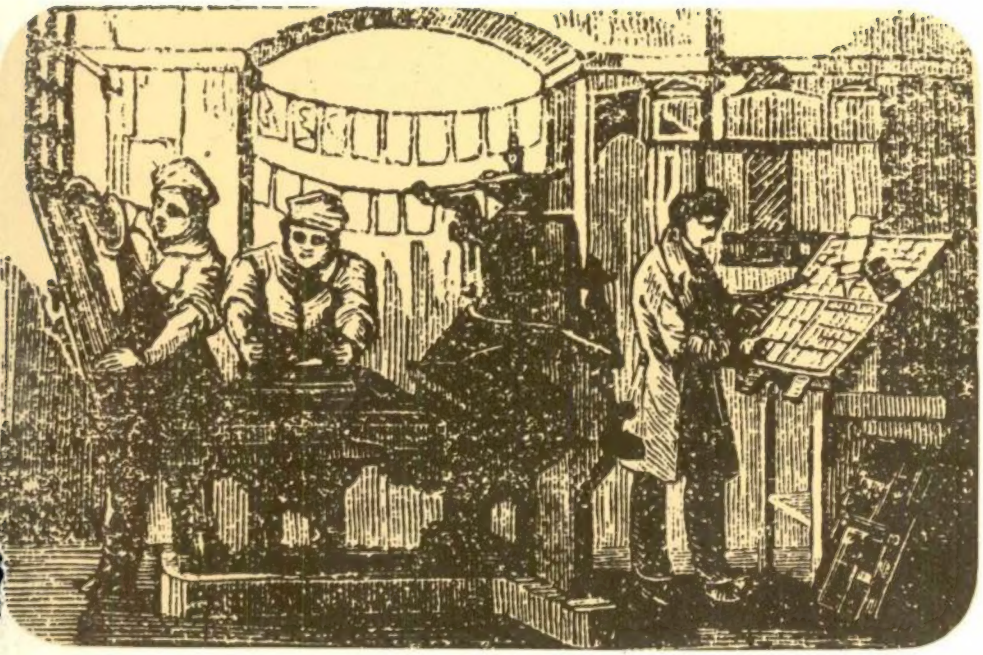
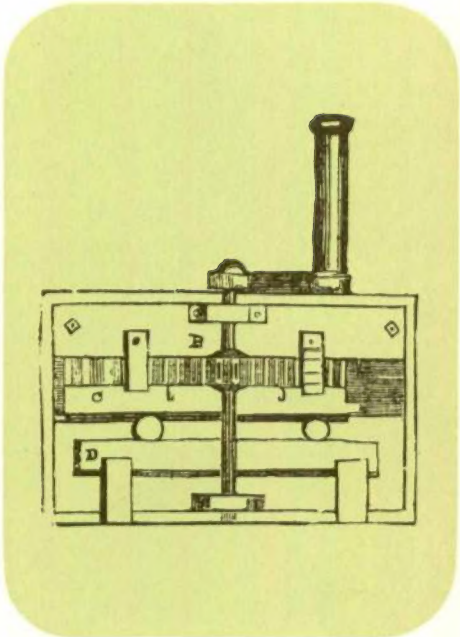
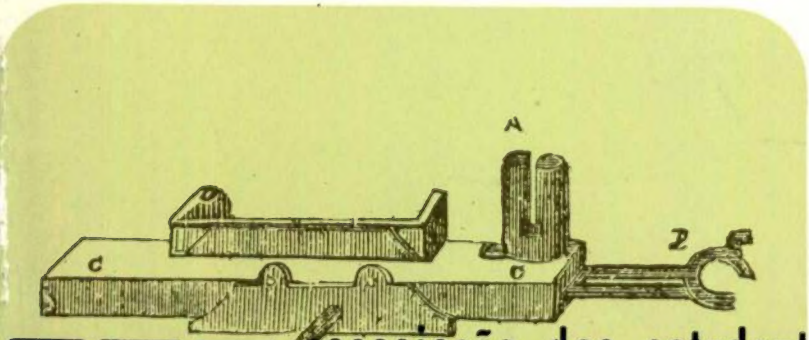
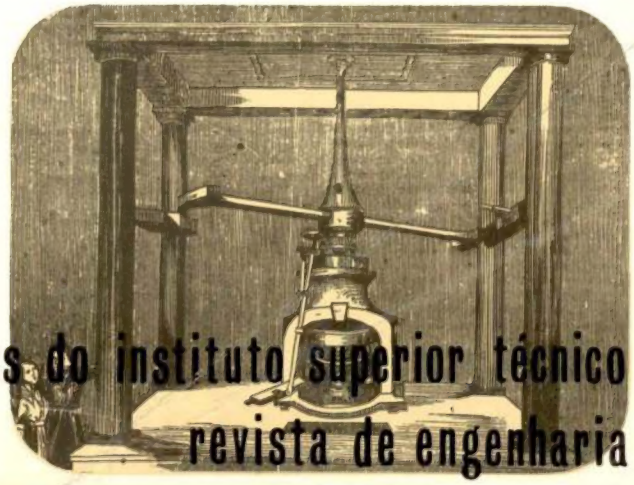
técnica









375 associação dos estudantes do instituto superior técnico
fevereiro 1968 revista de engenharia

HELIAÇO

VARÕES DE AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA PARA BETÃO ARMADO TIPO A. 40
(«Heliaço» e «SNT 40»)

TENSÕES DE SEGURANÇA
Ra = 2400 kg/cm²
e
Ra = 4000 kg/cm² (SISMOS)

Literatura e Tabelas de Cálculo fornecidas gratuitamente

HELIAÇO, LDA.

R. DE S. JULIÃO, 41, 4.º D. — LISBOA

Tel.: 36 78 17 - 32 37 06 - 36 94 77

Fenner

REDUTORES DE VELOCIDADE
TIPO «PONTA DE VEIO»

mais de cem anos de progresso dos maiores fabricantes ingleses

REPRESENTANTES EXCLUSIVOS:
AUTO-LUSITANIA
ALFREDO DUARTE L.da
AV. DA LIBERDADE 73-77 LISBOA

confiança para a construção com

materiais novobra

pavimentos
em betão pré-esforçado
(homologados pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil)

SOCIEDADE DE PRÉ-FABRICAÇÃO E OBRAS GERAIS NOVOBRA, LDA.
AV. EST. UNIDOS DA AMÉRICA, 100 - 5.º D.º - TEL. 774832 / 771603 - LISBOA 5

CIMENTO SECIL

SECIL

Fábrica:
Outão — Setúbal
Telef. 228824/5

Escritório:
R. do Comércio, 56-3.º
LISBOA 2
Telef. 328201/2/3

técnica

NUMERO 375 FEVEREIRO DE 1968 ANO XLIII VOLUME XXX PUBLICAÇÃO MENSAL

Director
Vítor M. M. Pinto

Administrador
Vítor Coias e Silva

Redactores
Ana Maria Sobral
A. J. Tavares Pires
. C. Alves da Silva
João M. Pereira

Editor e Proprietário
Associação dos Estudantes
do Instituto Superior Técnico

Redacção e Administração
Avenida Rovisco Pais
Telefone 77 54 49
Lisboa 1

Assinaturas

		5 N.os	10 N.os
Continente e Ilhas	—	70$00	130$00
Ultramar, Brasil e Espanha	—	80$00	140$00
Estrangeiro	—	90$00	150$00

Número avulso — 20$00

Não se publica em Agosto e Setembro.

Os artigos assinados são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Composto e impresso na Tipografia Jorge Fernandes, Lda. — Rua da Cruz dos Poiais 103 — Lisboa

SUMÁRIO

245 *CARVALHO FERNANDES* — **Microelectrónica, circuitos integrados. Semicondutores.**

Microelectronics. Integrated circuits. Semi-conductors.

263 *MANUEL ROCHA, A. DA SILVEIRA, M. CRUZ AZEVEDO* e *BAPTISTA LOPES* — **Influência da muito alta deformabilidade de fundação na concepção e comportamento de uma barragem abóbada**

Influence of a very high deformability of the foundation on the conception and behaviour of an arch dam.

277 *FERREIRA DO NASCIMENTO* — **Benefícios económico-sociais das auto-estradas**

Economical and social benefits of highways

295 *LEOPOLDO CORTEZ* — **Princípios gerais e métodos de investigação na flutuação de minérios**

Ore flotation: general principles and investigation methods

262 **Notas Informativas**

Elementos sobre a produção e o consumo de energia na rede eléctrica nacional

315 **Bibliografia**

CAPA: Máquinas de imprensa. Gravuras reproduzidas de «O Panorama», 1840.

ÍNDICE ALFABÉTICO DOS ANUNCIANTES

	Pág.
A. Johnson & Co (Portugal), Ltd.	XXVIII
AEG	XIX
Aguiar e Melo, Lda.	XXVII
Asea Eléctrica	V, VII, XXIX e XXXI
Auto-Lusitânia	2.ª da capa
Cerâmica de Vale de Lobos, Lda.	XVIII
Cimento Secil	2.ª da capa
Companhia de Cimentos Brancos	VI
Construções Técnicas	XV
Dial	XVIII
Electro-Arco, Ltd.ª	IV
Empresa de Cimentos de Leiria	XXII e XXX
Empresa Electro Cerâmica	XXIX
Empresa de Produtos Asfálticos	X
Empresa de Sondagens e Fundações Teixeira Duarte, Lda.	3.ª da capa
Empresa Técnica de Equipamentos Eléctricos	XI
Empresa Ultramarina de Sondagens e Fundações	XVI
Fanafel	XVI
Fundações Franki, Lda.	I
Guedal	XVIII
Guedes & Almeida, Lda	XXXII
Heliaço	2.ª da capa
I. S. T.	XXVI
Isoluz	XXII
J. J. Silva & Irmão	V
J. F. Azevedo e Silva	IV
J. Roma	VII
Jayme da Costa, Lda.	XVII
Johann Keller	V
MAGUE	XIII
Manuel J. Monteiro	XIV
Novobra, Lda.	2.ª da capa
Quinzena Técnica de Paris	XX
Rotring	XXVI
Siemens	XXI
Soc. Const. Amadeu Gaudêncio	XXVI
Soc. Brown Boveri	4.ª da capa
Soc. Michaelis de Vasconcelos	XII
Sociedade Portuguesa Cavan	VI
Sondagens e Fundações A. Cavaco	II
Sondagens Ródio, Lda.	VII
Sopecate	II
Standard Eléctrica	IX
Tudor	XXXI
Wild Portugal, Lda.	III

Oficinas VOLVO da Auto Sueca, Lda.
PORTO

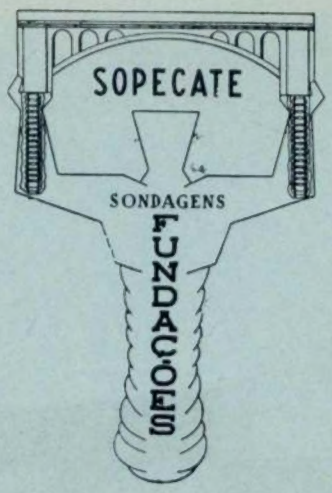
Assente sobre Estacas FRANKI

FUNDAÇÕES FRANKI L.DA

RUA BRAAMCAMP, 13-3.º — LISBOA 1 — TEL. P. P. C. 53 41 12/3/4 — ENDEREÇO TELEGRÁFICO: FRANKI — LISBOA

PRÉDIO SANTOS GIL, 6.º ANDAR — SALA 10 — TEL. 9 11 67 — CAIXA POSTAL 1397

ENDEREÇO TELEGRÁFICO: FRANKI—LOURENÇO MARQUES



SOPECATE

SONDAGENS
FUNDAÇÕES

Escritório — R. DO ARSENAL, 146, 2.º Esq., Dt.º e Fr.te
Estaleiro e Oficina — RUA PEREIRA HENRIQUES, 58

TELEFONES
SERVIÇOS ADMINISTRATIVOS 34010
SERVIÇOS TÉCNICOS 320208
ESTALEIRO E OFICINAS 381238

LISBOA

• ESTUDOS, PESQUISAS E CAPTAÇÕES DE ÁGUA

• SONDAGENS

• REBAIXAMENTO DE NÍVEIS AQUÍFEROS

• FUNDAÇÕES

SONDAGENS E FUNDAÇÕES A. CAVACO, LDA.

R. RODRIGO DA FONSECA, 62, R/C ESQ. — LISBOA-1
- TELEF. 56 11 71/72/73

ELECTRO-ARCO, L.DA

ELÉCTRODOS ✦ POSTOS ✦ ACESSÓRIOS
PARA A SOLDADURA ELÉCTRICA

*

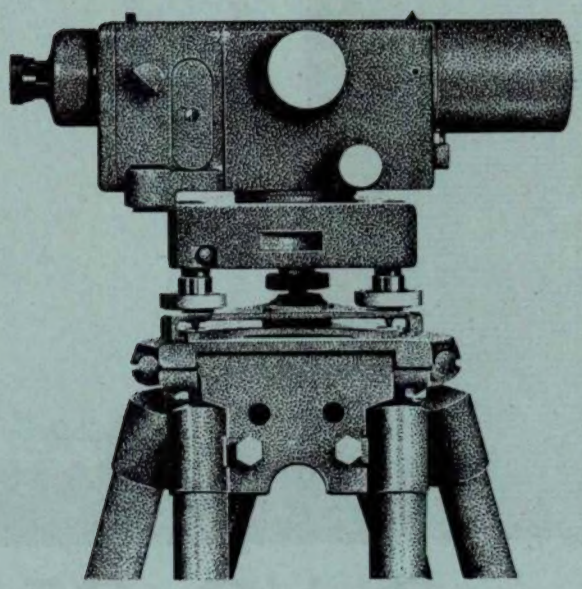
MATERIAL APROVADO PELOS
LLOYD'S REGISTER OF SHIPPING
BUREAU VERITAS
GERMANISCHER LLOYD

LISBOA
Rua Silva Carvalho, 239
Tels. 68 36 49 - 68 48 93
FÁBRICA E LABORATÓRIOS
Venda Nova — Amadora
Tels. 97 06 13 - 97 17 33
PORTO
Rua do Bolhão, 216
Tel. 2 12 77 - 39 44 73

O novo Nível automático de engenheiro

WILD NAK 2

com círculo horizontal



WILD
HEERBRUGG

Para nivelamentos de média e grande precisão; com micrómetro de lâmina de faces plano-paralelas para nivelamentos de grande precisão.

Erro médio para 1 Km de nivelamento duplo: ± 1,5 mm

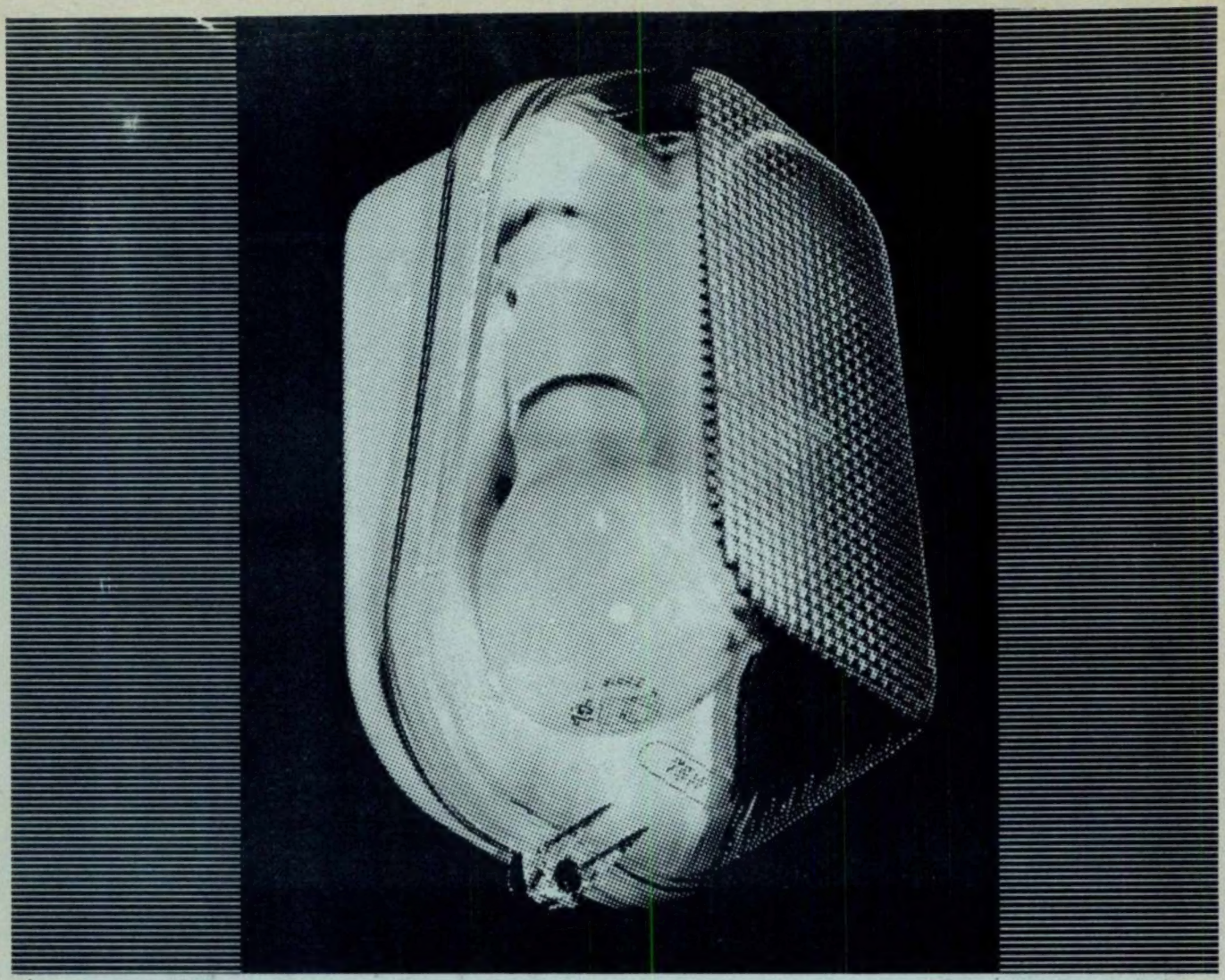
Erro médio para 1 Km de nivelamento duplo com micrómetro: ± 0,4 mm

Luneta de 30 × de aumento com imagem direita de observação

Solicitem catálogo ou demonstração aos representantes exclusivos

WILD PORTUGAL, LDA.

PRAÇA DAS ÁGUAS LIVRES, 8
LISBOA - 2 — TELEFONE 68 91 12



Ímpar

OLHO DE BOI

JF SAREL

TIPO 421-E 75W

Armadura «olho de boi» estanque, com caixa em chapa e difusor em plástico inquebrável translúcido, equipada com casquilho E 27, com uma entrada para bucim, com 21 mm de diâmetro.

Articulação do difusor em charneira superior, e fecho com parafuso de aperto.

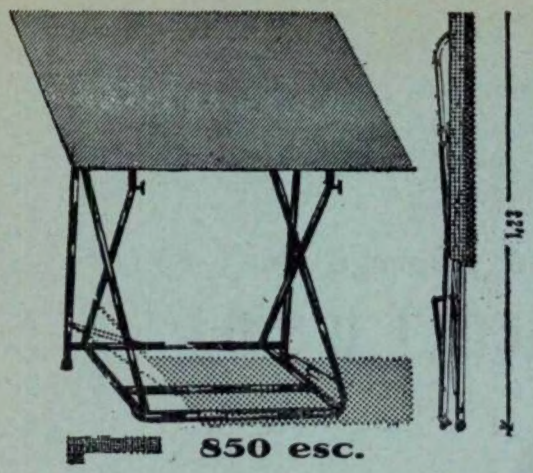
Vedação com anel de borracha.

Para lâmpadas até 75 W.

JF

J. F. DE AZEVEDO E SILVA & C.ª, L.DA

Rua S. Francisco Sales, 2 **Telef. 654165 · Lisboa-1**



850 esc.

CARACTERÍSTICAS: Tubo de aço, articulado em qualquer posição, várias inclinações, fàcilmente transportável, não ocupa espaço quando fechado, prancheta de 1,20 × 0,80 de madeira, em tola. Pintura de estufa.

Em exposição, outros modelos de madeira e metálicos e todo o material de consumo e equipamento de desenho, escritório e papelaria

Distribuidores exclusivos, em Lisboa, do estirador de ***Fábrica Olaio***

J. J. SILVA & IRMÃO, LDA.

rua silva carvalho 232-b · lisboa · telefone 652750 / 680671

O EMPREGO DO CIMENTO BRANCO...

permite acabamentos mais perfeitos, mais duradouros e muito mais económicos

Estude a vantagem do emprego do

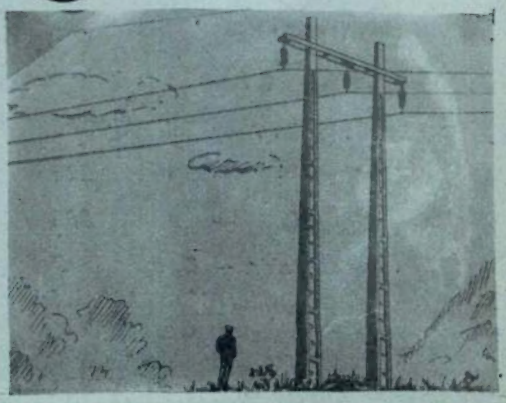
CIMENTO BRANCO LUSO

Consulte os distribuidores gerais

No Sul: **SCIAL** — T. do Corpo Santo, 15 — Telef. 66 61 86 — Lisboa
No Norte: **SCIAL** — R. do Bonjardim, 205 — Telef. 2 5779 — Porto

POSTES DE BETÃO PARA LINHAS ELÉCTRICAS
MOSAICOS E AZULEJOS
COLUNAS PARA ILUMINAÇÃO PÚBLICA
MANILHAS PARA ESGOTOS

SOCIEDADE PORTUGUESA
Carvam



RUA D. ESTEFÂNIA, 94-A-LISBOA-1 -TELEF. 47812-50129

SONDAGENS RÓDIO, L.DA

LISBOA

RUA DE S. BENTO, 644 - 3.º

Telefones: 68 80 96/7/8 ✦ Telegramas: SETANSOL

RODIO

SONDAGENS GEOLÓGICAS
ESTUDOS GEOTÉCNICOS
ESTACAS GUNITA
CAPTAÇÃO DE ÁGUAS
CONGELAÇÃO DO TERRENO
IMPERMEABILIZAÇÃO DE OBRAS HIDRÁULICAS
CONSOLIDAÇÃO DE FUNDAÇÕES
ABAIXAMENTO DO LENÇOL DE ÁGUA

—//—

Engenheiro Consultor: **Walter Weyermann**

- SOLDADURA ELÉCTRICA
- MATERIAL DE PROTECÇÃO

Aparelhagem de medidas eléctricas

- indicadora
- reguladora
- registadora

J. ROMA, L.DA

P. da Figueira, 12, 1.º — LISBOA Tel. 865151

P. do Município, 309-6.º S. 3 — PORTO Tel. 0236732

MARCA - A.E.3

Uma força criadora no domínio da electricidade

Contactores ASEA

Uma linha completa de contactores para todos os calibres de pequenas dimensões, práticos de montar e desmontar, sem problemas de manutenção e fáceis de ligar.

ASEA ELÉCTRICA LDA.

Estrada do Prior Velho
Tel. 2511101
SACAVÉM

R. do Campo Alegre, 144
Tel. 62106/7
PORTO

FUNDAMENTOS DE RADIOCOMUNICAÇÕES

pelo Prof. Abreu Faro

Preço 30$00

GUIA DE ANÁLISE QUÍMICA DAS ÁGUAS

Pelo Prof. Herculano de Carvalho

Preço 90$00

TABELAS PARA O CÁLCULO DE BETÃO ARMADO

por Fernando Vasco Costa

5.ª edição revista e aumentada pelo autor e por João d'Arga e Lima

Preço 140$00

TABELAS TÉCNICAS

5.ª edição revista e aumentada

Preço 160$00

TOPOGRAFIA GERAL

pelo Eng.º A. C. Xerez

1.º Volume — 2.ª edição revista e aumentada
2.º » — 2.ª » » » »

Preço de cada volume 150$00

MANUAL DE HIDRÁULICA

pelo Eng.º Armando C. Lencastre

(Em preparação a 2.ª edição)

CÁLCULO DE PÓRTICOS

por G. Kani

Preço 50$00

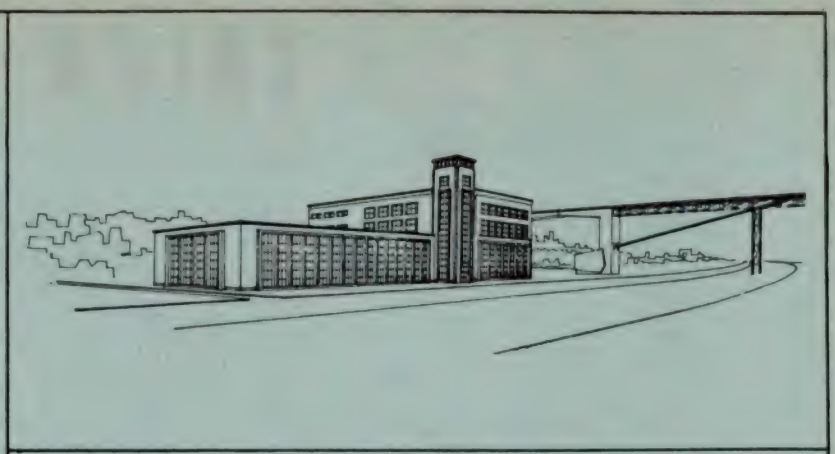
DICIONÁRIO DE UNIDADES E TABELAS DE CONVERSÃO

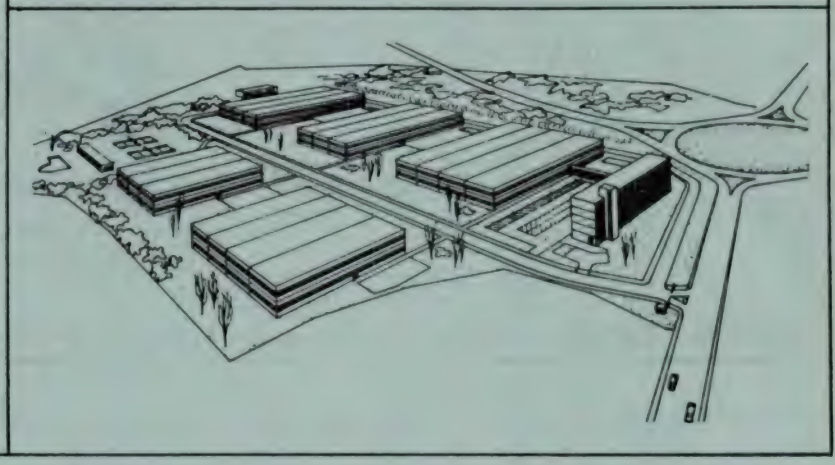
pelo Eng.º Vasco Costa e Osvaldo Francês

Preço 35$00

Pedidos à "Técnica"

Desconto: 10 % aos assinantes





O CRESCIMENTO COMO FACTOR DE DESENVOLVIMENTO

Tal como as árvores, quando bem cuidadas, criam raízes, crescem, ramificam-se e dão bons frutos, assim as empresas, quando bem dirigidas, definem uma posição, desenvolvem-se, diversificam as suas actividades e lançam nos mercados produtos de alta qualidade.

A Standard Eléctrica, pioneira da indústria das Telecomunicações e Electrónica em Portugal, que em 1932 não dispunha de mais de uma escassa dezena de empregados, conta hoje com mais de 2200 pessoas nas suas fábricas de Lisboa, Cascais e Luanda. O ritmo de crescimento e expansão tem sido de tal modo elevado que o volume de vendas passou de 30 000 contos em 1957 para 300 000 em 1967, prevendo-se que em 1970 a produção total da Standard Eléctrica atinja o valor de 1 500 000 contos, dos quais 1 000 000 se destinam à exportação.

A Standard Eléctrica é, pois, um valor positivo na indústria nacional, que tem como base o elevado nível técnico e profissional e ainda o magnífico esforço de todos os que nela trabalham.

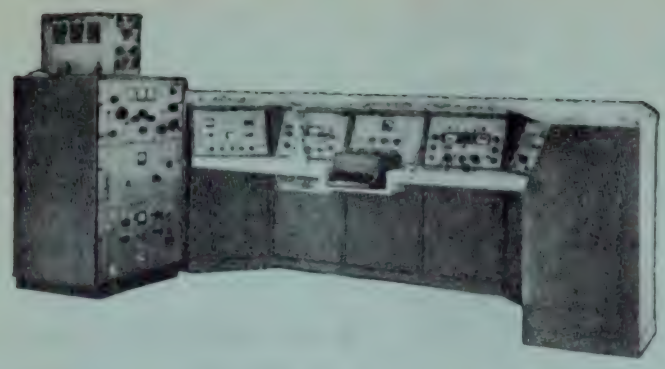
Standard Eléctrica **ITT**

PARA COLAGEM DE TACOS DE MADEIRA USE:

Também próprio para:
impermeabilizar terrenos,
paredes, fundações, etc.

FÁBRICA EM SACAVÉM

RUA FILIPE FOLQUE-10 1º— LISBOA
TELEF. 53 01 56 —TELEG. EPALDA-LISBOA



Comunicações

equipamentos
e sistemas completos

- Cuidadosamente projectados
- Amplamente experimentados
- Completamente integrados

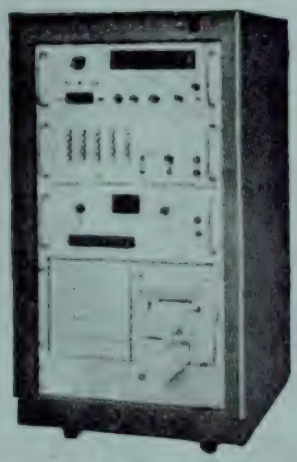
THE TECHNICAL MATERIEL CORPORATION

HEWLETT **PACKARD**

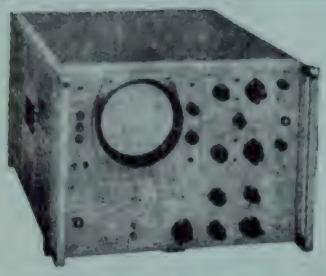
aparelhagem electrónica de medida e registo

Osciloscópios, Oscilógrafos, Voltímetros electrónicos, Geradores de sinal, Contadores electrónicos, Registadores digitais, Fontes de alimentação

Registador digital Dymec



Registador Sanborn



Osciloscópio HP

Contador Electrónico HP

TELECTRA EMPRESA TECNICA DE EQUIPAMENTOS ELECTRICOS, S.A.R.L.

Os pára-raios Oerlikon... ... estão na vanguarda do progresso e protegem instalações em todo o mundo

Corrente de descarga 5 kA

RV
380 & 500 V

Descarga de longas linhas em vazio, protecção de postos completos, transformadores, alternadores ou consumidores ligados a linhas aéreas. Para cada função, o pára-raios apropriado.

OERLIKON

VG/WG
6 – 37 kV

Corrente de descarga 5 e 10 kA respectivamente Ondas rectangulares 75A 1000 µs e 150A 2000 µs

WGE
40 – 73 kV

Corrente de descarga 10 kA Ondas rectangulares 150A 2000 µs Membrana anti-explosão

WM/WMR
50 – 500 kV

Insuflação magnética Corrente de descarga 10 kA, Ondas rectangulares 1000A 2000 µs Membrana anti-explosão

Para indicações mais amplas consultar os nossos representantes Sociedade Michaëlis de Vasconcellos, Ltda. Porto e Lisboa

Ateliers de Construction Oerlikon · Zurich (Suiça)

Representantes para Portugal e Ultramar: Sociedade Michaëlis de Vasconcellos, Lda., Porto e Lisboa

técnica

NUMERO 375 FEVEREIRO DE 1968 ANO XLIII VOL. XXX PUBLICAÇÃO MENSAL

C. D. U. 621.38

MICROELECTRÓNICA. CIRCUITOS INTEGRADOS SEMICONDUTORES (*)

por ANTÓNIO A. DE CARVALHO FERNANDES
Prof. do I. S. T.

RESUMO

Este artigo constitui a lição dada pelo Autor, na II Semana de Engenharia Electrotécnica, no I. S. T., com o objectivo de passar em revista os princípios da microelectrónica e os conceitos básicos relativos à tecnologia, ao projecto e à fabricação de circuitos integrados semicondutores. Faz-se ainda referência ao impacto da microelectrónica nos cursos de engenharia electrotécnica e à expansão prevista para a indústria da electrónica e da microelectrónica em Portugal.

SYNOPSIS

This is a lecture given to undergraduate electrical engineering students, to pass in review the principles of microelectronics and the basic concepts involved in the technology, the design and the fabrication of semiconductor integrated circuits. Reference is also made to the impact of microelectronics in the electrical engineering University courses and to the expansion being planned for the industry of electronics and microelectronics in Portugal.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os sistemas electrónicos tendem a tornar-se cada vez mais complexos e são cada vez maiores as exigências quanto ao seu comportamento; por outro lado, as restrições quanto ao volume ocupado, peso e consumo de energia são cada vez mais apertadas.

Quem tenha acompanhado a evolução, por exemplo, dos equipamentos electrónicos militares móveis e portáteis, terá testemunhado estas duas tendências antagónicas: por um lado, equipamentos cada vez mais complicados e assegurando melhores comunicações; por outro, equipamentos cada vez mais leves e mais pequenos.

Outro campo em que as exigências, quanto a equipamentos electrónicos, são cada vez maiores, é o da astronáutica; também aí se necessita, a par da maior complexidade, o menor peso e o menor volume possíveis.

Na vida civil, este antagonismo verifica-se também sistemàticamente. Exemplos concretos são os sistemas de comunicações múltiplas, quer por cabos coaxiais quer por ligações hertzianas, os modernos computadores e os sistemas de automação industrial.

Só com a miniaturização, e o que hoje podemos chamar «micro-miniaturização» da electrónica, se pode dar satisfação ao dilema a que nos referimos. Só com dispositivos electrónicos em que as dimensões que condicionam o seu funcionamento são da ordem da fracção de micron, por outras palavras, só com a microelectrónica é possível satisfazer simultâneamente as duas tendências opostas de maior complexidade e melhor comportamento dos sistemas, por um lado, e de

(*) Conferência proferida na II Semana de Engenharia Electrotécnica, Lisboa, Fevereiro de 1968.

menor tamanho e menor consumo de energia, por outro.

Outra circunstância que precisamos ainda ter em vista, pela sua generalidade, é a necessidade, sempre premente, de reduzir os preços de custo.

Pois bem, o objectivo desta exposição consiste em passar em revista as linhas gerais da evolução da microelectrónica e os conceitos básicos relativos à tecnologia, ao projecto e à fabricação dos chamados «circuitos integrados semicondutores».

2. MICROMINIATURIZAÇÃO. MICROMÓDULOS. MICROCIRCUITOS DE CAMADA FINA. CIRCUITOS INTEGRADOS SEMICONDUTORES

Foi com a invenção e desenvolvimento dos transistores (1948-1952) que a miniaturização em electrónica começou a ser francamente viável. De facto, os transistores, ao substituirem as válvulas electrónicas em muitas aplicações, vieram trazer-nos uma redução considerável no espaço ocupado e no consumo de energia. Assim se deu o primeiro grande passo no campo da miniaturização.

Durante os anos imediatamente a seguir ao desenvolvimento dos transistores, houve uma certa letargia por parte da indústria, no caminho da miniaturização. Por um lado, era preciso, digamos, digerir, obsorver, entender as novas possibilidades que a «electrónica do estado sólido» nos oferecia, e desenvolver e aperfeiçoar as técnicas de fabricação e utilização dos transistores; por outro lado, a indústria não tinha ainda os incentivos financeiros necessários para progredir ràpidamente no campo da miniaturização.

Foi a competição, ràpidamente intensificada no fim da década de 1950/60, entre os E. U. A. e a Rússia, particularmente nos campos dos mísseis e dos satélites, que levou à atribuição de verbas consideráveis com o objectivo de se progredir ràpidamente para a microminiaturização e ao mesmo tempo se conseguir maior segurança [1] (ou fiabilidade, como tende a dizer-se) no funcionamento dos dispositivos electrónicos.

O programa dos «micromódulos» foi lançado nos E. U. A. em 1957; os micromódulos são conjuntos de componentes convencionais, discretos, miniaturizados, arrumados de maneira muito compacta de modo a ocupar o menor espaço possível. No mesmo ano, foi começado o programa dos «microcircuitos de camada fina» em que todo o circuito é colocado numa pequena pastilha ou bolacha de 1 a 1,5 cm de diâmetro; os conjuntos de camadas finas (da ordem de um micron de espessura) sobre uma placa de material inerte formam um substracto que engloba resistências, condensadores e indutâncias, a que podem juntar-se, por soldadura, díodos e transistores. Os «microcircuitos de camada fina» constituem um dos tipos de estrutura de principal importância na microelectrónica.

Outro tipo principal de estrutura foi lançado logo a seguir à dos microcircuitos e tem-se desenvolvido paralelamente: a dos «circuitos integrados semicondutores» em que, num conjunto monolítico de cristal, se engloba um circuito completo em que as funções e comportamento dos componentes perdem, até certo ponto, a sua identidade discreta. Apesar disso, é possível atribuir várias funções electrónicas a certas regiões do cristal, de modo que a análise e o projecto de um circuito possam ser feitos, em certa medida, utilizando as técnicas usuais relativas a circuitos de componentes discretos, de parâmetros concentrados ou distribuídos. A versatilidade electrónica dos semicondutores abrange, como sabemos, propriedades de resistência e de capacidade eléctricas, além de propriedades de rectificação, de amplificação e de comutação; além destas, podem conseguir-se, através do «efeito de túnel» nas junções P-N degeneradas, efeitos de resistência dinâmica negativa. Um problema difícil que se apresenta nos circuitos integrados semicondutores é o de assegurar efeitos indutivos e a este respeito diremos, mais à frente, algumas palavras.

Ainda hoje não há acordo completo quanto à terminologia a adoptar em microelectrónica [1] e há quem abranja na designação de «circuitos integrados» os «microcircuitos de camada fina» e os «circuitos integrados semicondutores».

Existe contudo uma tendência nítida para se-

[1] Em Inglês, «Reliability», em Francês, «Fiabilité».

[1] Quase com o mesmo sentido, com que empregamos aqui a palavra «microelectrónica», se encontram na literatura as designações «electrónica integrada» e «electrónica molecular». V., p. exp., o N.º 12, Vol. 52, Dez. 1964, dos «Proceedings of the I. E. E. E.», inteiramente dedicado ao campo da «Electrónica Integrada».

parar estes dois tipos de estruturas e utilizar apenas a designação de «circuitos integrados» quando nos referimos a «circuitos integrados semicondutores».

Por outro lado, quando nos referimos a estes circuitos, temos em mente não só os «circuitos monolíticos», em que um determinado circuito é construído num simples bloco de material semicondutor, mas ainda os «circuitos múltiplos» [1] que podem ser formados por dois ou mais blocos semicondutores, cada um deles contendo vários componentes do circuito (resistências, condensadores, transistores e díodos) e interligados de modo a formarem um circuito completo montado numa só caixa.

Além destes três tipos fundamentais de estruturas: (1) micromódulos, (2) microcircuitos de camada fina, (3) circuitos integrados semicondutores, têm sido adoptados outros tipos, mas de menor importância; destes, deverá referir-se a estrutura de circuitos de camada espessa (com espessuras da ordem dos 20 a 30 microns). Há, além disso, soluções híbridas.

Para dar uma ideia da redução que se consegue no espaço necessário para circuitos electrónicos, vejamos qual é a ordem de grandeza da «densidade de componentes» que é possível obter nos diferentes tipos de estruturas.

Tipo de estrutura	Número de componentes por decímetro cúbico
— Circuitos convencionais com válvulas	30 a 150
— Circuitos convencionais com transistores	1 500
— Micromódulos	15 000
— Microcircuitos de camada fina	30 000
— Circuitos integrados semicondutores	300 000

Como vemos por estes números, a utilização de transistores levou a uma redução de espaço de 10 a 50 vezes, em relação a circuitos com válvulas. Os micromódulos trouxeram mais uma redução de 10 vezes. Os microcircuitos de camada fina, uma redução para metade. Em relação a estes últimos, os circuitos integrados semicondutores trouxeram mais uma redução de 10 vezes.

Estes números dão uma ideia das ordens de grandeza mas são cautelosos e, com circuitos integrados semicondutores, já é possível exceder a densidade de 300 000 componentes por dm^3.

Deve salientar-se que, além das dimensões dos elementos em jogo, há outra limitação muito importante que se apresenta quanto ao número de componentes por unidade de volume: — a inevitável dissipação de energia sob a forma de calor e a dificuldade de remover esse calor de modo que a temperatura não atinja valores que levariam à destruição da respectiva estrutura. Nos circuitos integrados semicondutores, a temperatura máxima que se pode permitir em dispositivos de germânio é apenas de 100° C; nos de silício, é de 200° C. Hoje, quase só o silício é empregado como material semicondutor básico nos circuitos integrados semicondutores.

Destes tipos de estrutura, são os circuitos integrados semicondutores e os microcircuitos de camada fina os que têm, presentemente, maior desenvolvimento, não só pela microminiaturização que permitem mas ainda por outras razões que convém salientar devidamente: a alta fiabilidade que se consegue nos sistemas que os utilizam; o baixo custo que resulta da sua produção largamente automatizada; e as vantagens mais subtis que consistem na redução do número de partes separadas de um sistema complexo, na melhor adaptação eléctrica e mecânica dos seus componentes e ainda na redução no tempo de propagação devido às menores dimensões em jogo.

Um exemplo concreto [1] em que a redução no tempo de propagação foi essencial é o «sistema anti-míssil balístico Nike-X» que é equivalente em capacidade de processamento de dados a um conjunto de 110 computadores IBM tipo 7094. Dada a complexidade do sistema, as demoras na propagação correspondentes a cada elemento de lógica têm que ser limitadas a alguns nanosegundos. A utilização de circuitos integrados semicondutores tornou possível reduzir o tempo de propagação, como se requeria.

Para se ter uma ideia da importância da indús-

(1) «Multichip circuits», em Inglês.

(1) V. artigo «Nike-X Advances Microcircuit Technology, na revista «Aviation Week and Space Technology», Out. 23, 1967).

tria da microelectrónica basta referir que o valor total do mercado nos E. U. A. para componentes microelectrónicos (circuitos integrados monolíticos, microcircuitos de camada fina e soluções híbridas) foi em 1967 de 7,7 milhões de contos ([1]), esperando-se que aumente ràpidamente de modo a ter atingido o dobro em 1971. Deste total, 90 % diz respeito a circuitos integrados monolíticos.

3. FIABILIDADE. REDUNDÂNCIA

A tecnologia das estruturas dos microcircuitos de camada fina e dos circuitos integrados semicondutores permite uma fiabilidade muito mais elevada do que a que se consegue nos sistemas convencionais com componentes discretos. De facto, na microelectrónica, as intraconexões substituem as ligações por aperto ou por soldadura da electrónica convencional; deste modo se evitam fontes sistemáticas de avaria. Por outro lado, as pequenas dimensões das estruturas sólidas da microelectrónica permitem uma protecção muito mais eficaz contra variações de temperatura, choque, vibração, radiação nuclear e ataque corrosivo, o que permite aumentar grandemente a segurança de funcionamento.

Finalmente, a microelectrónica permite a utilização das técnicas de redundância — juntando elementos adicionais destinados a assegurar uma capacidade de funcionamento em paralelo — o que vem também aumentar a segurança de funcionamento do sistema. A adição de elementos redundantes é viável na microelectrónica em virtude das pequeníssimas dimensões em jogo e do insignificante aumento de custo.

Como é que se define concretamente a fiabilidade de um sistema? Pela probabilidade do sistema se não avariar (isto é, de se manter em funcionamento normal) durante um período de tempo especificado e operando em condições bem determinadas.

Outro conceito muito importante, relativo a componentes, é o de «taxa de avaria». Suponhamos que um lote de componentes fabricados é submetido a um ensaio de vida, em determinadas condições de funcionamento. A «taxa de avaria» pode ser dada, por exemplo, pela percentagem de avarias por, digamos, 1000 horas de funcionamento. Conhecendo as taxas de avaria, típicas, para os componentes de um dado sistema e fazendo várias hipóteses simplificativas quanto às avarias relativas às ligações pode calcular-se a fiabilidade do sistema.

No conjunto Nike-X ([1]) cada microcircuito tem uma taxa de avaria típica de 5 avarias por 10^9 horas ([2]). Como cada sistema tem cerca de 200 000 microcircuitos, é de esperar que o sistema possa funcionar durante aproximadamente 1000 horas antes de um dos seus 200 000 microcircuitos se avariar.

É evidente que se adicionarmos componentes redundantes, capazes de funcionar em paralelo com os componentes indispensáveis, se aumenta a fiabilidade dum sistema. Há, contudo, que distinguir dois tipos fundamentais de redundância: activa (ou de reserva) e passiva. Um exemplo de redundância activa é o caso de uma rádio-ajuda à navegação aérea equipada com um emissor de serviço e um emissor de reserva, em que este último é automàticamente posto em funcionamento se o primeiro se avariar. Por outro lado, a redundância passiva é ilustrada pelo exemplo bem conhecido de um avião de 4 motores, que pode normalmente funcionar só com 3 ou mesmo com 2 motores.

Em sistemas electrónicos empregamos ambos os tipos de redundância. É mais frequente, contudo, a redundância passiva, podendo o número de elementos redundantes ser muito mais elevado que o número de elementos mínimos essenciais, em circuitos relativamente complexos, com o objectivo de se atingir uma fiabilidade elevada. Um pequeno comentário: num sistema sem redundância, a fiabilidade é necessàriamente inferior à dos respectivos componentes; com redundância, a fiabilidade do sistema pode ser francamente superior à dos componentes.

Porquê, todas estas considerações sobre fiabilidade e redundância? Para salientar que a microelectrónica, pelas razões que vimos, nos oferece vantagens consideráveis.

([1]) Números dados no artigo «Electronics markets», pág., 101, «Electronics», Vol. 41, N.º 1, Jan. 8, 1968.

([1]) V. artigo já citado.

([2]) ou seja 5 «Fits». O termo «Fit» corresponde a uma avaria por 10^9 dispositivo . hora.

4. FUNÇÕES FUNDAMENTAIS EM CIRCUITOS INTEGRADOS SEMICONDUTORES. FILOSOFIA DE PROJECTO

Como já dissemos, um circuito integrado monolítico é contido num cristal (de minúsculas dimensões) de material semicondutor. Neste cristal, há certas regiões a que estão associadas determinadas funções electrónicas.

Como já referimos, existem nos dispositivos semicondutores propriedades de resistência e de capacidade, além das características de rectificação, de amplificação e de comutação. Também já mencionámos o efeito de túnel que nos assegura características de resistência dinâmica negativa.

Vejamos agora como se podem obter estas funções num circuito integrado.

Resistências

Um semicondutor apresenta uma certa resistividade e, desde que consigamos aplicar-lhe contactos «óhmicos» (isto é, sem propriedades de rectificação), podemos obter uma resistência com um valor bem determinado. Uma representação típica é dada na fig. 1.

Fig. 1

Exemplos de contactos óhmicos: de alumínio, chumbo e estanho em semicondutor tipo N; de ouro, em semicondutor tipo P.

Estas resistências são independentes da tensão aplicada mas apresentam, nalguns casos, forte dependência com a temperatura. O coeficiente de temperatura pode ir desde $\pm 50.10^{-6}/°C$ até $\pm 2000.10^{-6}/°C$. Podem obter-se resistências com valor global desde $100\,\Omega$ até $10\,M\Omega$ permitindo uma dissipação que pode ir até 150 mW. As tolerâncias quanto ao valor da resistência são da ordem de $\pm 10\,\%$ a $\pm 20\,\%$. Se se pretender uma resistência variável com a tensão aplicada, pode usar-se um transistor unipolar (por efeito de campo).

Condensadores

Como sabemos, uma junção P-N apresenta um efeito capacitivo. As capacidades associadas às junções têm uma importância fundamental nas limitações, quanto à frequência, dos dispositivos electrónicos semicondutores e é por isso que se têm desenvolvido projectos e técnicas de fabricação desses dispositivos com o objectivo de reduzir ao mínimo essas capacidades. Quase tudo na vida tem contudo o seu aspecto útil. No caso das junções P–N podemos tirar partido da sua capacidade associada para obtermos condensadores em circuitos integrados. Como sabemos, a capacidade da junção dependerá dos materiais semicondutores (semicondutor intrínseco e concentração de impureza), do gradiante de impureza na junção e da tensão aplicada. Quando se usam grandes concentrações de impureza, podem obter-se capacidades de 10^5 pF/cm² de junção. A tensão de disrupção é, nesses casos, muito baixa (de alguns Volt).

Com menor concentração de impureza, obtêm-se capacidades da ordem de 10^4 pF/cm², para tensões de disrupção superiores a 100 Volt. As junções usadas como condensadores são sistemàticamente polarizadas em sentido inverso (uma polarização no sentido directo levaria, pràticamente, a um curto-circuito aos terminais) e apresentam uma certa corrente de fuga que, para uma capacidade da ordem de $0.1\mu F$ e uma tensão inversa de 10 Volt, pode ser da ordem de 10^{-6} a 10^{-10} Ampere.

Uma representação típica de um condensador obtido a partir de uma junção P-N é dada na fig. 2.

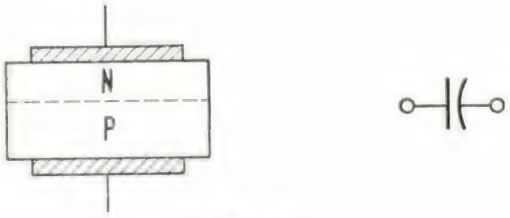


Fig. 2

Para evitar alguns dos inconvenientes referidos, foi criado outro tipo de condensador cuja representação esquemática é dada na fig. 3. Sobre o bloco de semicondutor faz-se «crescer» uma camada fina do seu óxido que actua como dieléctrico e sobre a qual se deposita uma camada

de metal evaporado, por exemplo, o alumínio. Neste caso, a capacidade é pràticamente independente da tensão aplicada. Capacidades de 10^4 pF/cm² podem ser fàcilmente obtidas, com tensões de disrupção da ordem de 50 Volt. Este condensador não precisa, ainda, de qualquer polarização. A estabilidade em relação à temperatura é melhor do que nos condensadores de junção.

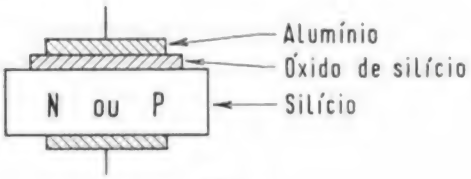


Fig. 3

É de notar que os valores da capacidade que se podem obter em circuitos integrados são muito baixos, não sendo possível obter valores da ordem de alguns μF. Esta limitação será pois muito importante no projecto de circuitos integrados e ocorre perguntar, p. exp.: — os circuitos habituais de polarização estabilizada (1) em que se utiliza, em série com o emissor, uma resistência R_E contornada por uma capacidade C (como se ilustra na fig. 4) que, em A. F., precisa ser de algumas dezenas de microfarad — para evitar a realimentação negativa em funcionamento dinâmico — podem ser realizados em circuitos integrados?

(1) V. § 16.7.3, Cap. XVI, Livro IX da Obra do Autor citada na Bibliografia.

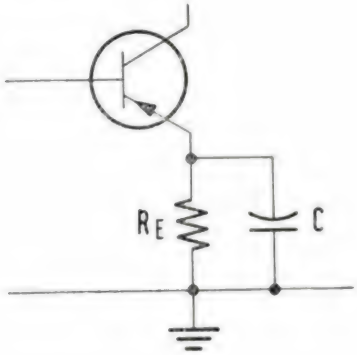


Fig. 4

O acoplamento R-C entre andares de amplificação (1) (como se ilustra na fig. 5) que exige a utilização, em A. F., de condensadores de acoplamento C_a de alguns microfarads, pode continuar a ser utilizado em circuitos integrados?

A resposta, a estas perguntas, é negativa.

Que fazer, então? Procurar outros circuitos que assegurem resultados equivalentes e que, por um lado, evitem as limitações que encontramos nos circuitos integrados e, por outro, tirem partido das facilidades especiais que nos oferecem os circuitos integrados.

Vamos exemplificar, considerando um cir-

(1) V. § 17.3 6, Cap. XVII, Livro X da obra citada.

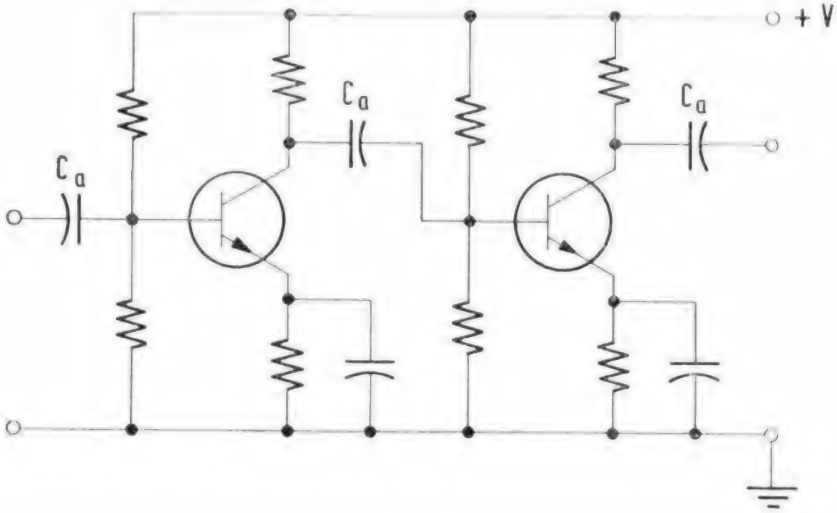


Fig. 5

cuito[1] muito simples, de fácil realização em circuitos integrados. Neste circuito, que se representa na fig. 6, temos dois transistores idênticos e precisamos ainda de ter duas resistências iguais.

Como já referimos, as tolerâncias com que se obtêm funções (p. exp. resistências e capacidades) são muito largas (10 a 20 %). Mas precisamos contudo dizer que é possível conseguir, no mesmo circuito integrado, valores idênticos em resistências, em condensadores, em díodos e em transistores com coeficientes de temperatura idênticos entre si, dentro de grande aproximação (até 4 ou 5 %). É pois fácil obter transistores razoàvelmente idênticos e desse facto pode tirar-se grande partido, como vamos exemplificar em relação ao circuito da fig. 6 em que são idênticos os transistores TR_1 e TR_2 e as resistências R_3 e R_4.

Prova-se ainda que será

$$V_{CE_2} \simeq V\left(1 - \frac{R_2}{R_1}\right) \qquad (4)$$

o que torna muito fácil a obtenção do ponto de funcionamento desejado. O circuito da fig. 6 é pois um exemplo prático de como se pode obter uma polarização estabilizada, com uma estabilidade muito boa (o valor de I_C não depende dos parâmetros do transistor) sendo muito fácil o dimensionamento das funções (resistências) em jogo. Este circuito dá ainda o exemplo de um acoplamento sem capacidade.

Redes Resistência — Capacidade

Combinando as propriedades de resistência e de capacidade a que nos referimos podem realizar-se redes RC como a que se ilustra na re-

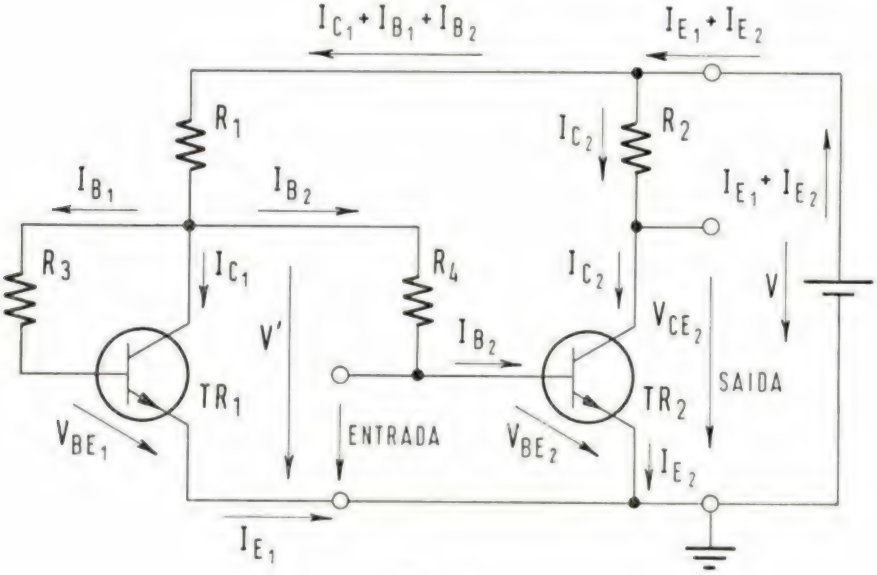


Fig. 6

No apêndice n.º 1 prova-se também que serão iguais as correntes de base I_B, as tensões V_{BE} e as correntes de colector e que, se for

$$V_{BE} << V \qquad (1)$$

$$\left(2 + \frac{R}{R_1}\right) I_B << I_{C_1} \quad , \qquad (2)$$

será

$$I_{C_1} = I_{C_2} \simeq \frac{V}{R_1} \qquad (3)$$

[1] Trata-se do circuito representado na fig. 2.2 da publicação «The application of linear microcircuits» da SGS — Fairchild, de Agosto de 1967.

presentação esquemática da fig. 7. Essencialmente, temos entre os eléctrodos A e B uma resistência. A junção P-N dá-nos um condensador

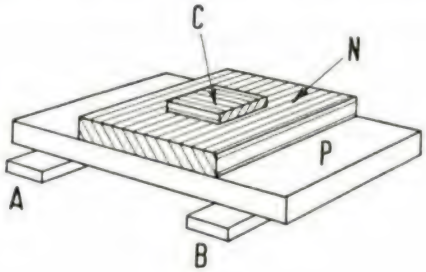


Fig. 7

que nos aparece distribuído entre os terminais A-B e o terminal C, segundo o esquema da fig. 8.

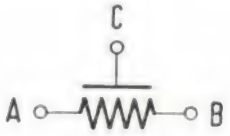


Fig. 8

Com este dispositivo pode obter-se uma rede passa-alto como no esquema da fig. 9 ou uma rede passa-baixo como no esquema da fig. 10.

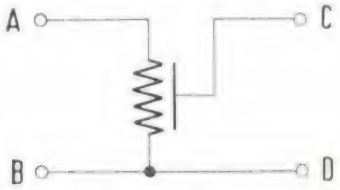


Fig. 9

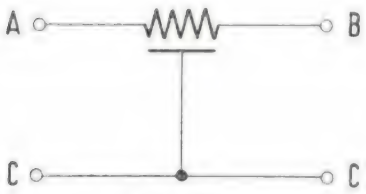


Fig. 10

Estes circuitos precisam ser estudados tendo em consideração as propriedades de resistência e capacidade distribuídas. Este estudo, apesar de ser simples, reveste-se de aspectos muito interessantes e está apresentado na literatura [1].

Indutâncias reais e simuladas

Um dos problemas mais difíceis que se apresentam na microminiaturização consiste em realizar indutâncias de valor elevado, ocupando um pequeno volume.

Quer nos microcircuitos de camada fina, quer nos circuitos integrados semicondutores, é pràticamente impossível obter indutâncias integradas no circuito. Que se faz então? Segue-se um dos três seguintes caminhos: (1) projectar o circuito de modo a não precisar usar indutâncias (p. exp., num circuito oscilador, usar malhas R-C em vez de circuitos sintonizados com indutâncias e condensadores); (2) utilizar circuitos, com elementos activos, cuja impedância de entrada seja fortemente indutiva (o que se chama «uma indutância simulada»); (3) utilizar a solução híbrida de soldar, quer ao circuito de camada fina, quer ao circuito integrado, uma bobina exterior, com núcleo de ferrite (bobinas miniaturizadas com uma configuração planar, em espiral, com valores do coeficiente de auto-indução da ordem dos μH são frequentemente usadas em circuitos de alta frequência).

Vejamos como se podem obter circuitos, sem indutâncias, apresentando uma impedância de entrada fortemente indutiva.

Consideremos o circuito de um transistor, numa montagem de emissor comum, e suponhamos que ligamos entre a base e o emissor um condensador C_1 e ligamos entre o colector e a base uma resistência R_1. Supondo que o funcionamento é linear e que, no circuito equivalente do transistor, desprezamos a tensão h_{re} V_{ce}, o esquema equivalente do conjunto é representado na fig. 11.

No apêndice n.º 2 mostra-se que se for

$$\omega C_1 h_{ie} >> 1 \qquad (5)$$

$$\omega C_1 R_1 >> 1 \qquad (6)$$

a admitância do circuito será dada por

$$y_i = \frac{\dot{I}}{\dot{V}} \simeq \frac{1}{R_1} + h_{oe} + \frac{h_{fe}}{h_{ie} \cdot j\,\omega C_1 R_1} \qquad (7)$$

o que significa que o circuito será equivalente à associação em derivação das resistências R_1 e $1/h_{oe}$ e de uma auto-indução L de valor

$$L = \frac{h_{ie}}{h_{fe}} C_1 R_1 \qquad (8)$$

Este circuito serve pois para simular um circuito indutivo segundo o esquema da fig. 12, podendo simular-se assim valores de L relativamente elevados.

No caso de querermos exprimir o valor de L em função dos parâmetros r_b, r_e, r_c e α bastará

(1) V. p. exp. § 6.11 da obra de Levine citada na Bibliografia.

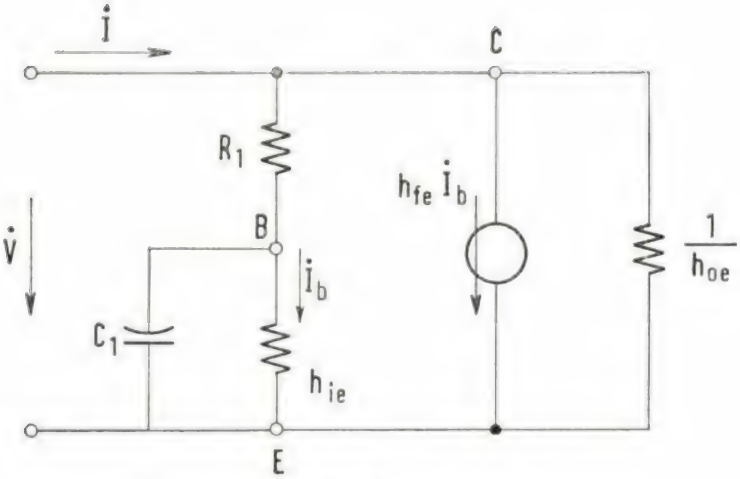


Fig. 11

ter em consideração que, para a montagem de emissor comum, será

$$h_{ie} \simeq r_b + \frac{r_e}{1-\alpha} \quad (^1) \qquad (9)$$

$$h_{fe} \simeq \frac{\alpha}{1-\alpha} = \beta \; (^1) \qquad (10)$$

de que resulta

$$L = \left(r_b + \frac{r_e}{1-\alpha}\right) \frac{1-\alpha}{\alpha} C_1 R_1 =$$

$$= \left[r_b + r_e (1+\beta)\right] \frac{C_1 R_1}{\beta} \qquad (11)$$

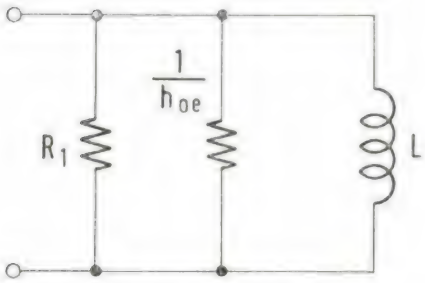


Fig. 12

Outro circuito que nos permite obter uma indutância simulada é o de um transistor, numa montagem de base comum, tendo na saída uma resistência $R_L << r_C$ e um condensador que, do ponto de vista dinâmico, para as frequências em jogo, funciona como um curto-circuito; o transistor deve trabalhar ainda para frequências próximo da frequência de corte (relativa a α) f_α. Utilizando o circuito equivalente de configuração em T teremos o esquema da fig. 13. Desprezando a corrente em r_C, a corrente em r_b será aproximadamente $\dot{I}_e(1-\alpha)$ e a impedância de entrada será

$$Z_i \simeq r_e + r_b (1-\alpha) \qquad (12)$$

No Apêndice n.º 3 prova-se que, para uma frequência f, próxima de f_α, este circuito é equivalente à associação em série de uma resistência R e de uma auto-indução L dadas, respectivamente, pelas expressões

$$R = r_e + r_b - \frac{r_b \cdot \alpha_o}{1 + (f/f_\alpha)^2} \qquad (13)$$

$$L = \frac{r_b}{2\pi} \cdot \frac{\alpha_o}{f_\alpha \left[1 + (f/f_\alpha)^2\right]} \qquad (14)$$

Trata-se pois de outro exemplo de um circuito que, utilizando apenas semicondutores, pode simular uma indutância L.

Outro processo de obter efeitos indutivos em dispositivos semicondutores consiste em utilizar díodos de junção especiais, chamados «díodos indutivos», que utilizam «efeitos de modulação de condutibilidade» em que se consegue que, para uma tensão alternada aplicada ao díodo, a corrente resultante lhe esteja em atraso. Estes

(1) Equações (113), Págs. XVI — 80 e 81, Livro IX da obra do Autor citada na Bibliografia.

dispositivos têm, contudo, pouco interesse prático por conduzirem a valores de L muito baixos, com factores de qualidade Q extremamente baixos. A sua estabilidade em relação à temperatura deixa muito a desejar.

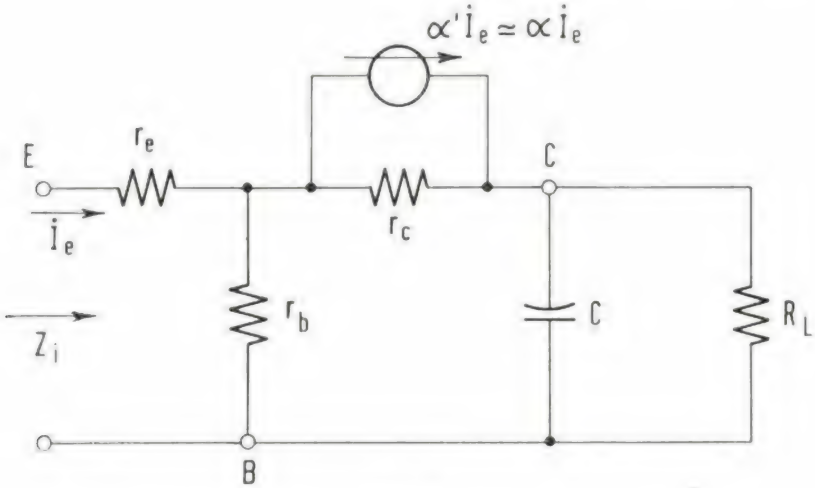


Fig. 13

5. ESTRUTURAS MONOLÍTICAS DE CIRCUITOS INTEGRADOS SEMICONDUTORES. PROJECTO E FABRICAÇÃO

Como já referimos, os microcircuitos de camada fina e os circuitos integrados semicondutores constituem os dois campos fundamentais em que se desenvolve a microelectrónica. Nesta exposição, temo-nos dedicado especialmente aos circuitos integrados semicondutores e, neste campo, vamos referir-nos em particular às estruturas monolíticas, em que um determinado circuito é construído num simples bloco de material semicondutor. Em relação a estas estruturas, vamos descrever, em breves palavras, os princípios fundamentais do projecto e fabricação.

No estado actual da arte, fabricam-se circuitos integrados semicondutores para uma grande variedade de aplicações. No campo da computação digital, em que existe uma normalização em larga escala, de circuitos típicos, os circuitos integrados, fabricados em grandes séries, têm uma grande utilização. A sua produção faz-se com regularidade, digamos, para «stock», e as grandes organizações de distribuição podem fornecer estes circuitos para entrega imediata. No campo dos amplificadores lineares (que engloba os amplificadores operacionais) também é possível uma certa normalização e a correspondente produção para «stock»; neste campo, contudo, é frequente serem necessários circuitos com características especiais que levam ao projecto e à fabricação de quantidades limitadas para, digamos, satisfazer encomendas especiais, e é então necessário dispor de facilidades, em técnicos e equipamento, para realizar o projecto e a fabricação, num período razoàvelmente curto, desses circuitos «feitos à medida do cliente». Naturalmente que os custos dos circuitos feitos para «stock», em grandes quantidades, serão muito menores do que os custos dos circuitos feitos à medida; mas, mesmo neste último caso, é preciso que a produção seja competitiva.

Os princípios do projecto destas estruturas monolíticas são baseados na tecnologia dos dispositivos semicondutores e nas técnicas — essencialmente para a formação de junções — à disposição do engenheiro. Dessas técnicas, as que maior desenvolvimento têm actualmente são: a junção por difusão, a junção por crescimento epitaxial e a junção semicondutor-metal depositado electroquìmicamente. O projecto das estruturas é, por sua vez, o resultado do projecto dos circuitos e, como já referimos, o projecto dos circuitos, para realização em estruturas monolíticas, reveste-se de aspectos muito peculiares, tendo em vista as limitações e as facilidades adicionais que se nos oferecem, em relação aos circuitos convencionais com componentes discretos.

Um dos pontos fundamentais na filosofia do projecto e da fabricação destas estruturas mono-

líticas consiste em definir concretamente os diferentes passos no processo a seguir, de modo a fabricar simultâneamente todos os elementos do circuito. Esses passos são quase os mesmos que os necessários para a fabricação de um simples transistor. A diferença fundamental entre a fabrição de transistores e a fabricação de circuitos integrados reside na necessidade, neste último caso, de projectar inicialmente uma série de complicadas máscaras fotográficas em sequência, que vão ser necessárias para fabricar, isolar e intraligar as várias partes do substracto de silício da estrutura monolítica. O projecto e a realização dessas máscaras e o estudo inicial são muito críticos e o seu custo é elevado; quando, contudo, esse custo é dividido por uma grande produção, torna-se pouco significativo.

Suponhamos um transistor com as suas duas junções, constituído por uma estrutura de três camadas, como se representa esquemàticamente na fig. 14. Se este transistor fosse fabricado como parte de um circuito integrado, teríamos de considerar a sua existência no substracto da estrutura monolítica a que pertence, como se ilustra na representação esquemática da fig. 15.

A diferença fundamental entre as estruturas das figs. 14 e 15 é que no primeiro caso, duas operações de difusão são necessárias para fabricar a base e o emissor, enquanto que, no segundo caso, são precisas três operações de difusão para se obterem, respectivamente, o colector, a base e o emissor; no primeiro caso, temos uma estrutura de três camadas, enquanto no segundo caso a estrutura tem quatro camadas; a camada adicional é o substracto da estrutura monolítica em que o transistor está integrado. A junção P-N do substracto com o colector representa um díodo que, quando polarizado inversamente, isola o transistor das outras partes do circuito.

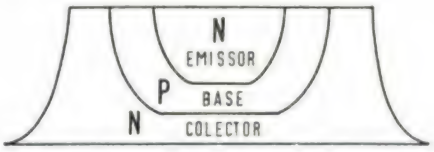


Fig. 14

Vejamos agora como se poderia conceber um circuito integrado simples, formado por dois transistores e dois díodos, conforme o esquema da fig. 16.

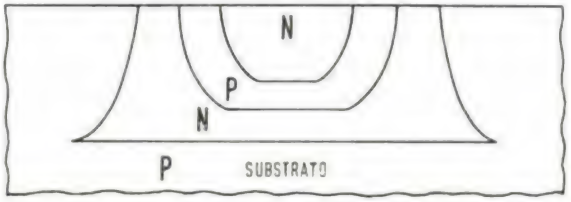


Fig. 15

Este esquema será realizado pràticamente numa estrutura como se representa na fig. 17.

O substracto de material tipo P deve ser polarizado negativamente em relação a qualquer dos colectores, respectivamente, de TR_1 e TR_2 e os transistores estão pois separados do substracto por díodos de junção polarizados negativamente, a que corresponde uma elevada resistência. Deve-

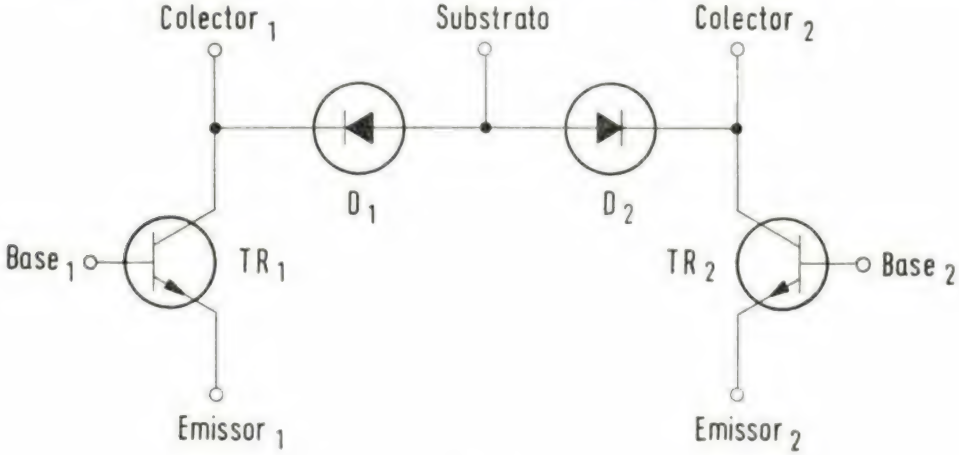


Fig. 16

mos notar, contudo, que estará sempre presente a capacidade inerente à junção.

Esta forma de isolamento entre elementos numa estrutura monolítica é usada com frequência. Um outro tipo de isolamento, que envolve a formação de uma camada de óxido de silício, tende contudo a ter maior utilização pelas vantagens que lhe são inerentes e que são essencialmente a redução drástica na capacidade parasita da junção, o aumento na tensão de disrupção e o aumento na resistência de isolamento (com a consequente redução na corrente de fuga).

Dos processos básicos utilizados na frabricação de circuitos integrados monolíticos, o que presentemente oferece maiores vantagens é o «processo epitaxial». Segundo este processo, a fabricação começa por uma bolacha de silício tipo P, de diâmetro igual a 2 a 3 cm, onde se vão formar algumas centenas de «dados» ([1]), cada um correspondendo a um circuito integrado monolítico. Estes dados são, depois de formados, separados uns dos outros, de modo a constituirem pequenos quadrados ou rectângulos de 1 a 2 mm de lado; a separação é feita por corte, com uma ferramenta de diamante, em máquinas quase automáticas, controladas microscòpicamente.

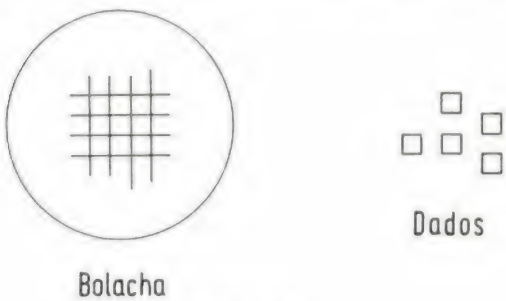


Fig. 18

Na fig. 18 representa-se esquemàticamente a bolacha com as centenas de dados, já formados, correspondendo cada um a um circuito integrado, e os dados já separados.

De resto, este mesmo princípio é seguido na fabricação de transistores em que há também uma bolacha onde vão ser formadas muitas centenas de transistores, cada um deles constituindo um «dado» rectangular.

Como já dissemos, dispõe-se inicialmente de uma bolacha de silício, tipo P; sobre esta obtém-se, por crescimento, uma película epitaxial de silício tipo N; são regiões desta película que vão, por operações subsequentes, ser individualizadas como colector de um transistor, como um dos elementos de um díodo, como uma armadura de um condensador, ou como um terminal de uma resistência.

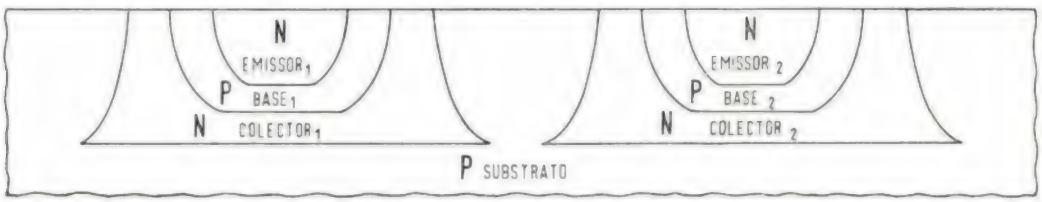


Fig. 17

Sobre essa película epitaxial de silício tipo N faz-se crescer, por acção térmica, uma película extremamente fina de bióxido de silício (como se ilustra na fig. 19), que serve de veículo para a operação foto-litográfica que se segue. Como resultado dessa operação, o filme de bióxido de silício fica apenas em regiões bem determinadas, segundo um desenho ou padrão prèviamente projectado e serve como uma máscara de protecção na operação de difusão que vem a seguir. Nessa operação, o elemento a difundir (o boro é muito usado) progride por difusão muito mais lentamente no óxido do que no silício; daqui resulta que o boro penetrará no silício apenas nas áreas que não estão cobertas pelo óxido. Este é, afinal, o princípio usado sistemàticamente na tecnologia dos circuitos integrados monolíticos,

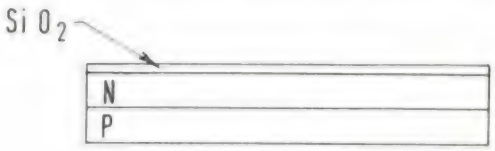


Fig. 19

([1]) Em inglês, «dice»; singular, «die».

nas várias operações de «difusão com máscara» [1] que vêm ainda a ser necessárias. Com efeito, operações sucessivas de foto-litografia e de difusão com máscara levam à formação dos outros elementos das funções desejadas (transistores, díodos, condensadores e resistências). Nestas operações, fósforo é difundido para a formação dos emissores dos transistores e das regiões catódicas dos díodos e condensadores; é ainda difundido nas outras regiões tipo N onde virá a ser necessário um contacto eléctrico óhmico. O material usado para estabelecer contactos eléctricos e interligações é o alumínio que vem a ser depositado, numa operação no vácuo, sobre toda a superfície da bolacha; numa operação subsequente (também com base fotográfica) o alumínio é eliminado, em parte, ficando apenas em certas regiões, segundo o padrão necessário para assegurar os contactos e as ligações necessárias.

Assim se fabricam as bolachas, cada uma delas com centenas de dados, cada um correspondendo a um circuito integrado monolítico completo.

Estas bolachas são depois submetidas a ensaios mecânicos e eléctricos. Nos ensaios eléctricos, feitos automàticamente, dado por dado, cada circuito integrado é ensaiado completamente Os dados que não satisfazem às especificações são automàticamente marcados a tinta, pela própria máquina, de modo a facilitar a sua eliminação posterior. Depois deste ensaio, os dados de cada bolacha são cortados e separados, também em máquinas automáticas. Seguem-se depois as operações de soldadura dos contactos para as ligações exteriores, de encapsulagem e ensaio final.

6. A MICROELECTRÓNICA NO ENSINO UNIVERSITÁRIO

Tendo em vista a importância cada vez maior da microelectrónica no domínio da engenharia electrotécnica, três professores [2] da Universidade de Stanford estudaram, nos fins de 1964, a medida em que os novos princípios da microelectrónica e as suas técnicas associadas deveriam ser tratados nos cursos de engenharia. Num artigo [1] publicado em Dezembro daquele ano apresentaram as suas conclusões. Sem pretender fazer um resumo desse trabalho, parecem contudo de salientar os seguintes pontos: (1) A unidade básica a considerar em engenharia tem sido o «componente» ou o «circuito individual»; há agora, como resultado da microelectrónica, uma tendência para a unidade básica passar a ser o «sistema». Em vez de nos preocuparmos com a «parte», devemos considerar o «todo»; o «todo» formado pelas partes que inter-actuam de modo a realizarem uma missão global. (2) Do ponto de vista do ensino, é preciso dar aos estudantes uma perspectiva do campo global da electrónica com base nos princípios fundamentais da física e da química; é preciso dar ainda grande ênfase à chamada «ciência de sistemas». Um engenheiro que venha a ocupar-se do projecto de circuitos deve ter uma boa formação básica quanto aos fenómenos do estado sólido; deve ter também bons conhecimentos nos domínios das teorias da comunicação, da realimentação, do processamento de dados; e estar à vontade em relação aos novos conceitos de redundância, limitações de interconexão, sistemas automatizados e lógica (3). A investigação nas universidades, no domínio da microelectrónica, oferece grandes oportunidades para se avançar neste novo campo. Por outro lado, especialmente nos países altamente industrializados, é indispensável assegurar uma estreita colaboração entre a universidade e a indústria, numa base de complementaridade.

Na nossa Escola, antevemos a necessidade de se dar maior desenvolvimento à chamada Física do Estado Sólido; de, nas cadeiras fundamentais da engenharia electrotécnica se dar maior importância aos sistemas de parâmetros distribuídos; e de, nas cadeiras da especialidade, sobretudo em Telecomunicações e em Electrónica Aplicada, darmos cada vez maior ênfase ao estudo de sistemas e dedicarmos menos tempo ao estudo de circuitos individuais.

---

[1] «masked diffusions», em inglês.

[2] J. G. Linvill, J. B. Angell e R. L. Pritchard.

[1] Integrated Electronics vs. Electrical Engineering Education — No. 12 — Vol. 52, Dez. 1964, Proceedings of the I.E.E.E.

7. A INDÚSTRIA DA ELECTRÓNICA E DA MICROELECTRÓNICA EM PORTUGAL

Finalmente, uma palavra sobre a indústria da electrónica e da microelectrónica em Portugal. Mercê de circunstâncias várias tende a desenvolver-se em Portugal uma forte indústria electrónica, sobretudo com vista aos mercados de exportação. Dessas circunstâncias, podemos salientar: a disponibilidade de mão de obra e a sua qualidade e custo; a existência de escolas técnicas e universidades assegurando uma boa preparação técnico-científica; o ambiente de desenvolvimento técnico e económico em que vivemos; a sólida situação financeira do nosso país; e a possibilidade de se assegurar uma direcção (que, em Inglês, se designa «management») a nível internacional.

No domínio dos componentes, já se fabricam, por exemplo, transistores a um ritmo de um milhão de unidades por semana, ritmo que vai aumentar ràpidamente), e memórias de ferrites, também a um ritmo muito elevado.

Módulos, constituindo circuitos completos que fazem parte de sistemas, por exemplo em televisores a preto-e-branco e a cores, são fabricados e exportados em larga escala.

Sistemas completos como radioreceptores, televisores, emissores e receptores de comunicações para uso militar e civil são fabricados correntemente entre nós para o nosso mercado e para exportação.

Qual é a ordem de grandeza da produção da indústria da electrónica em Portugal? Não existem estatísticas oficiais que nos dêem estes números. Cremos contudo que, presentemente, tendo em consideração as várias organizações em operação, a produção anual já se aproxima de um milhão de contos. No termo do Terceiro Plano de Fomento, que agora começa, esta produção terá provàvelmente triplicado, sendo o volume das exportações da ordem de dois milhões de contos. Isto significa que a electrónica será então uma das indústrias de exportação mais importantes no nosso país e, certamente, uma das indústrias que mais ajudará a nossa balança de pagamentos.

E quanto à microelectrónica, quanto aos circuitos integrados semicondutores? Sabemos que há planos concretos para se iniciar a fabricação em Portugal, de circuitos integrados, em larga escala, ainda no corrente ano. Os números a que nos referimos, quanto ao valor da produção, já abrangem pois a microelectrónica.

APÊNDICE N.º 1

Polarização estabilizada e acoplamento sem intervenção de condensadores

Consideremos um circuito, como se representa no esquema da fig. 20, em que os dois transistores TR_1 e TR_2 se podem considerar idênticos e as resistências R_3 e R_4 se podem também considerar idênticas, $R_3 = R_4 = R$.

Em relação a este circuito podemos escrever

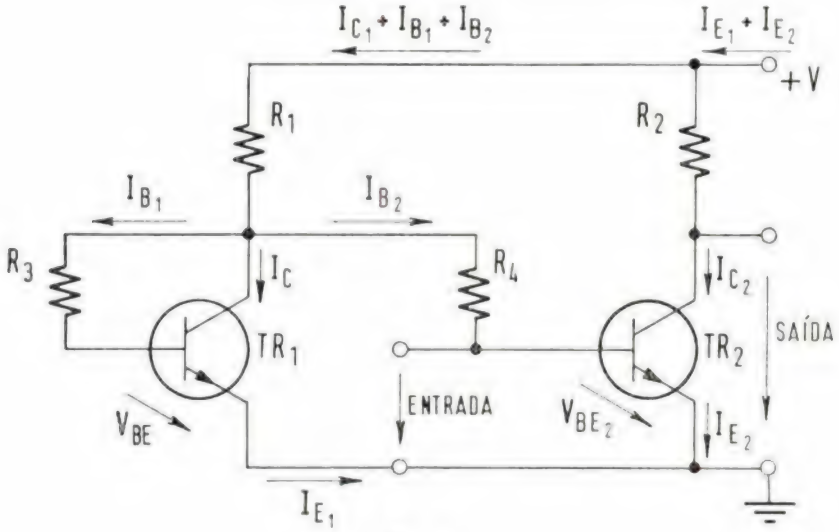


Fig. 20

$$V' - V_{BE_1} - I_{B_1} R_3 = 0 \qquad (15)$$

$$V' - V_{BE_2} - I_{B_2} R_4 = 0 \qquad (16)$$

Sendo

$$R_3 = R_4 = R \qquad (17)$$

e os transistores idênticos, será

$$V_{BE_1} = V_{BE_2} = V_{BE} \ (18) \ I_{B_1} = I_{B_2} = I_B \qquad (19)$$

e podemos ainda escrever

$$V - V_{BE} - I_B R - I_{c_1} R_1 - 2 I_B R_1 = 0 \qquad (20)$$

$$I_{c_1} R_1 = V - V_{BE} - I_B (R + 2 R_1) \qquad (21)$$

$$I_{c_1} = \frac{V - V_{BE}}{R_1} - \left(2 + \frac{R}{R_1}\right) I_B . \qquad (22)$$

Se for

$$V_{BE} << V \qquad (23)$$

$$\left(2 + \frac{R}{R_1}\right) I_B << I_{c1} \qquad (24)$$

virá

$$I_{c_1} \simeq \frac{V}{R_1} \qquad (25)$$

Por outro lado, por ser

$$I_c = h_{FE} I_B + I_{CEO} \ (^1) \qquad (26)$$

será, necessàriamente,

$$I_{c_1} = I_{c_2} \simeq \frac{V}{R_1} \qquad (27)$$

Será ainda

$$I_C R_2 + V_{CE_2} - V = 0 \qquad (28)$$

$$V - V \frac{R_2}{R_1} = V_{CE_2} . \qquad (29)$$

É de notar que, se for

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{1}{2} \qquad (30)$$

será

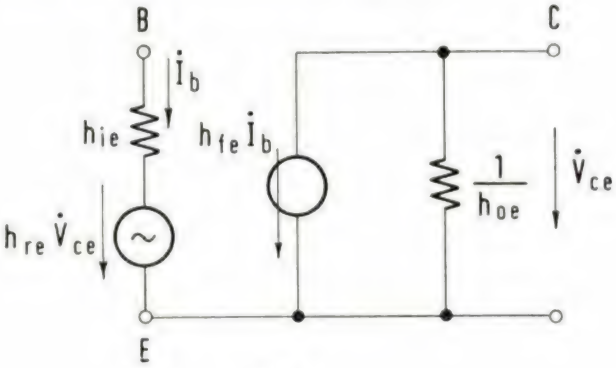
$$V_{CE_2} = \frac{V}{2} \qquad (31)$$

(1) Equação (141), Pág. XVI-94, Livro IX, da obra do Autor citada na Bibliografia.

APÊNDICE N.º 2

Circuito de indutância simulada

Consideremos o circuito de um transistor, numa montagem de emissor comum, tendo assegurada a polarização conveniente para o ponto de funcionamento desejado. Desprezando a influência dos componentes relativos à polarização, fica-nos o circuito básico equivalente do transistor (1) que representamos na fig. 21.



Fig, 21

Suponhamos que ligamos entre a base e o emisor um condensador C_1 e ligamos entre o colector e a base uma resistência R_1. Desprezemos ainda a tensão $h_{re}\dot{V}_{ce}$. Temos então o esquema equivalente representado na fig. 22.

Em relação a este circuito podemos escrever as seguintes equações:

$$\dot{V} = \dot{I}_1 \left(R_1 + \frac{h_{ie}}{1 + j\omega C_1 h_{ie}} \right) \qquad (32)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{V} \frac{1 + j\omega C_1 h_{ie}}{R_1 (1 + j\omega C_1 h_{ie}) + h_{ie}} \qquad (33)$$

$$\dot{V} = \dot{I}_3 \frac{1}{h_{oe}} \quad (34) \qquad \dot{I}_s = \dot{V} . h_{oe} \qquad (35)$$

$$\dot{I}_1 \frac{h_{ie}}{1 + j\omega C_1 h_{ie}} = \dot{I}_b . h_{ie} \qquad (36)$$

(1) Fig. 53-a, Pág. XVI-77, Livro IX da obra do Autor citada na Bibliografia.

$$\dot{I}_b = \frac{\dot{I}_1}{1 + j\omega C_1 h_{ie}} \qquad (37)$$

$$\dot{I}_2 = \dot{I} \frac{h_{fe}}{1 + j\omega C_1 h_{ie}} \qquad (38)$$

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = \dot{V} \left[\frac{1 + j\omega C_1 h_{ie}}{R_1 (1 + j\omega C_1 h_{ie}) + h_{ie}} + h_{oe} + \frac{h_{fe}}{R_1 (1 + j\omega C_1 h_{ie}) + h_{ie}} \right] \qquad (39)$$

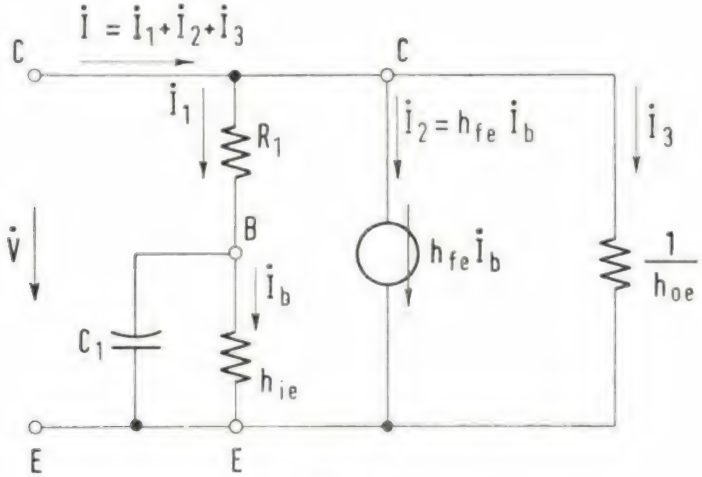


Fig. 22

Se for

$$\omega C_1 h_{ie} >> 1 , \qquad (40)$$

a admitância do circuito será, aproximadamente,

$$y_i = \frac{j\omega C_1 h_{ie}}{h_{ie} (1 + j\omega C_1 R_1)} + h_{oe} + \frac{h_{fe}}{h_{ie} (1 + j\omega C_1 R_1)} \qquad (41)$$

Se for ainda

$$\omega C_1 R_1 >> 1 \qquad (42)$$

será

$$y_i = \frac{1}{R_1} + h_{oe} + \frac{h_{fe}}{h_{ie} \cdot j\omega C_1 R_1} . \qquad (43)$$

A admitância de entrada entre os pontos C e E corresponde portanto à associação em derivação das resistências R_1 e 1/hoe e de uma auto-indução L cujo valor seja

$$L = \frac{h_{ie}}{h_{fe}} C_1 R_1 \qquad (44)$$

Este circuito serve pois para simular um circuito indutivo, segundo o esquema da fig. 23 em que L é dado pela expressão que deduzimos.

APÊNDICE N.º 3

Outro circuito de indutância simulada

Consideremos um circuito de um transistor, numa montagem de base comum, tendo na saída uma resistência $R_L << r_C$ e um condensador que, do ponto de vista dinâmico, para as frequências em jogo, tem uma reactância muito baixa; o transistor deve trabalhar em frequências próximo da frequência de corte f_α (relativa a α).

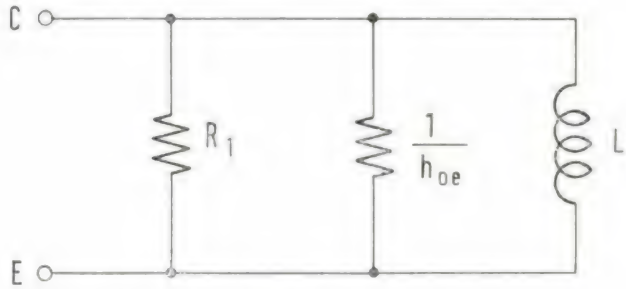


Fig. 23

O esquema equivalente de configuração em T é dado na fig. 24 (1).

Desprezando a corrente em r_c, a corrente em

(1) Fig. 38, Pag. XVI-56, Livro IX da obra do Autor citada na Bibliografia.

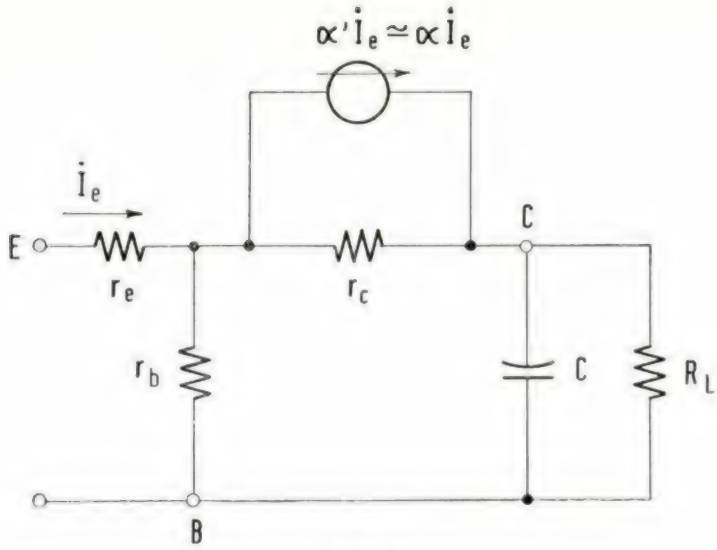


Fig. 24

r_b será aproximadamente $\dot{I}_e\,(1-\alpha)$ e a impedância de entrada será

$$Z_i = r_e + r_b\,(1-\alpha) \qquad (45)$$

Para uma frequência f próxima da frequência f_α o valor de α é complexo e é dado pela relação [1]

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{1 + j\dfrac{f}{f_\alpha}} = \frac{\alpha_0}{1 + (f/f_\alpha)^2}\left(1 - j\frac{f}{f_\alpha}\right) \qquad (46)$$

Substituindo em Z_i virá

$$Z_i = r_e + r_b - r_b\left[\frac{\alpha_0}{1 + (f/f_\alpha)^2}\left(1 - j\frac{f}{f_\alpha}\right)\right] \qquad (47)$$

$$= r_e + r_b \quad \frac{r_b\,\alpha_0}{1 + (f/f_\alpha)^2} + j\,\frac{r_b\,\alpha_0}{1 + (f/f_\alpha)^2} \qquad (48)$$

que corresponde à associação em série de uma resistência R e de uma auto-indução L dadas respectivamente, pelas expressões

$$R = r_e + r_b - \frac{r_b\,\alpha_0}{1 + (f/f_0)^2} \qquad (49)$$

$$L = \frac{r_b}{2\pi} \cdot \frac{\alpha_0}{f_\alpha\,[1 + (f/f_\alpha)^2]} \qquad (50)$$

[1] Equação (181), Pag. XVI-119, Livro IX da obra do Autor citada na Bibliografia.

BIBLIOGRAFIA

(1) Fernandes, A. A. de C. — Electrónica Aplicada — Livro IX — Transistores e outros elementos Semicondutores — Edição da AEIST.

(2) Fernandes, A. A. de C. — Electrónica Aplicada — Livro X — Circuitos fundamentais com Semicondutores — Edição da AEIST.

(3) Hunter, L. P. — Handbook of Semiconductor Electronics, McGraw — Hill Book Co., New York.

(4) Levine, S. N. — Principles of Solid-State Microelectronics — Holt, Rinehart and Winston, New York.

(5) Schwartz, S. — Integrated Circuit Technology — McGraw Hill Book Co., New York.

(6) Warner, R. M. and Fordemwalt, J. N. — Integrated Circuits — McGraw Hill Book Co., New York.

C. D. U. 621.311.5/91

ELEMENTOS SOBRE A PRODUÇÃO E O CONSUMO DE ENERGIA NA REDE ELÉCTRICA NACIONAL (*)

DEZEMBRO

I — Breve nota mensal

No conjunto do sistema, as afluências do mês de Dezembro totalizaram 352 GWh, correspondendo-lhes uma probabilidade de serem excedidas da ordem dos 89 % e um coeficiente de produtibilidade de 0,45.

O regime de afluências muito desfavorável durante o mês de Dezembro conduziu à continuação do regime de desarmazenamento nas albufeiras característico de estiagem. Assim, o armazenamento diminuíu de 128 GWh, situando-se no fim do mês em cerca de 635 GWh, valor este que corresponde a cerca de 30 % do enchimento máximo possível.

II — Elementos gerais (GWh)

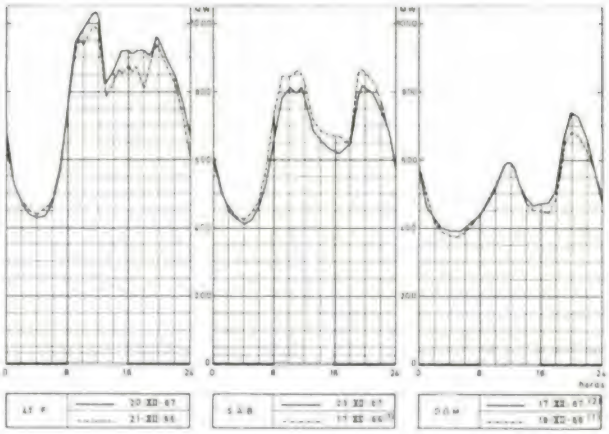
	a) Mensais 1966	a) Mensais 1967	Variação %
Produção hidráulica (P_h) . . .	509,0	469,6	— 8
Produção térmica (P_t)	4,1	29,5	+ 6,20
Produção total (P_T)	513,1	499,1	— 3
Energia recebida de empresas não pertencentes ao RNC (E_r)	3,0	1,7	— 43
Exportações (Ex)	0,0	2,3	—
Importações (I)	0,0	5,7	—
Saldo importador (S_I)	0,0	+ 3,4	—
Consumo em bombagem (C_b)	0,0	0,0	0
Produção para consumos perman. (P_{cp})	444,5	479,0	(1) + 7,8
Produção para consumos não perman. (P_{cnp}) . . .	71,6	25,2	— 65
Total	516,1	504,2	— 2
Coeficiente de hidraulicidade	0,80	0,45	—

NOTA

(1) O aumento percentual da produção para consumos permanentes, tendo em conta a incidência dos domingos e dias especiais, é respectivamente de 11,2 e 9,5 %.

III — Diagramas de carga dos dias característicos

			4.ª feira: 1966	4.ª feira: 1967
Produção hidráulica		(P_h) MWh	18 315	16 350
Produção térmica		(P_t) MWh	0	2 426
Produção total		(P_T) MWh	18 315	18 776
Trocas com Energia:	Export.	(Ex) MWh	0	19
	Import.	(I) MWh	0	130
Consum em bomb. hidroel.		(C_b) MWh	0	0
Prod. para cons. perm.		(P_{cp}) MWh	15 897	18 102
Prod. para cons. não perm.		(P_{cnp}) MWh	2 418	785
TOTAL		$P_T + (I - Ex)$ MWh	18 315	18 887
Características dos diagramas	$P_T + (I - Ex)$	Potência máx. MW	992	1 028
		Potência mín. MW	439	430
		Utiliz. da ponta horas	18,5	18,4
		Factor de carga	0,77	0,77
	P_{cp}	Potência máx. MW	886	994
		Potência mín. MW	343	398
		Utiliz. da ponta horas	17,9	18,2
		Factor de carga	0,75	0,76



IV — Energia armazenada nas principais albufeiras

Albufeiras:	No fim do mês GWh	No fim do mês % (1)
Alto Rabagão	324,4	33,3
Paradela	52,0	23,4
Venda Nova	65,6	51,3
Salamonde	10,3	37,3
Caniçada	12,7	38,4
Vilar	4,7	4,7
Cabril	72,7	21,7
Castelo do Bode	60,3	37,0
Guilhofrei	1,3	15,7
Lagoa Comprida	10,3 (2)	27,4
Santa Luzia	13,5	21,9
Pracana	6,0	46,5
Póvoa	0,7 (3)	4,8
Total { com A. Rabagão . . .	635,5	29,9
Total { sem A. Rabagão . . .	311,1	27,1

NOTAS

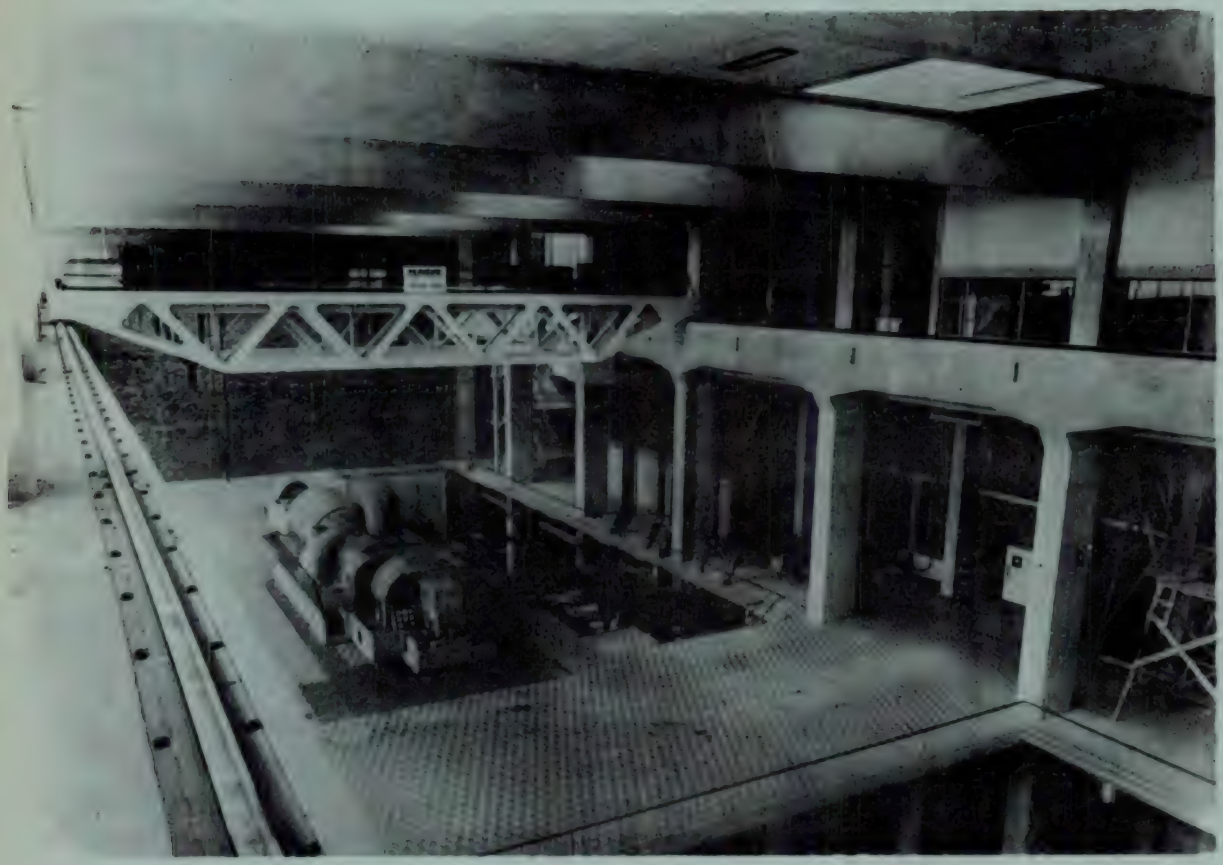
(1) Coeficiente de enchimento em energia das albufeiras.

(2) Inclui 2,4 GWh armazenados em Vale do Rossim no início do mês e 0,7 GWh no fim do mês.

(3) Inclui 0,6 GWh armazenados no açude do Poio no início do mês e 0,2 GWh no fim do mês.

(*) *Elementos extraídos das estatísticas mensais do Repartidor Nacional de Cargas (R. N. C.). As produções e os consumos das empresas do R. N. C. representam cerca de 94 % dos totais do País.*

MAGUE



PONTE ROLANTE ELÉCTRICA DE 100 t - 10 t / 22 m, EM SERVIÇO NA CENTRAL TÉRMICA DA TAPADA DO OUTEIRO

PONTES ROLANTES, GUINDASTES E APAR. DE ELEVAÇÃO ESPECIAIS	*Projecto e fabrico*
TURBINAS HIDRÁULICAS	*Fabrico segundo licença de A. C. M. de Vevey, S. A.*
TURBINAS A VAPOR	*Fabrico segundo licença de Brown Boveri, Cie.*
CALDEIRAS A VAPOR	*Projecto e fabrico segundo licença de Foster Wheeler, Co.*
EQUIPAMENTOS E INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS	

CONSTRUÇÕES METALOMECANICAS **MAGUE** S.A.R.L

ALVERCA DO RIBATEJO — PORTUGAL

PARA HOSPITAIS
E CASAS DE SAUDE
HOTEIS PENSÕES
RESTAURANTE
BARES
CANTINAS etc.

panelas
de pressão

aquecedores
de pratos e
de travessas

lava louças

torradeiras

fritadeiras

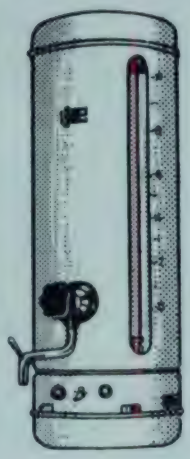
grelhadores

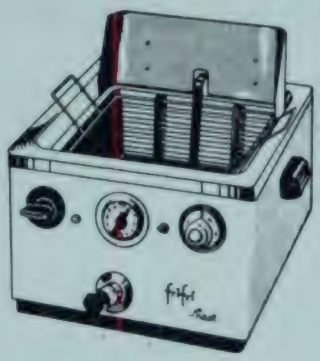
cortadoras
electricas

fornos de
pastelaria

equipamentos
completos
para
lavandaria

EQUIPAMENTO PARA GRANDES COZINHAS





MJM

distribuidores
MANUEL J. MONTEIRO & Cª Lª
RUA DOS CORREEIROS 140 TEL 3660644 3242546 LISBOA

C. D. U. 627.825.04.001.57
624.131.388:627.82

INFLUÊNCIA DA MUITO ALTA DEFORMABILIDADE DE FUNDAÇÃO NA CONCEPÇÃO E COMPORTAMENTO DE UMA BARRAGEM ABÓBADA

por MANUEL ROCHA
Director do Laboratório Nacional de Engenharia Civil

A. F. DA SILVEIRA
Engenheiro Investigador, Chefe do Serviço de Barragens do Laboratório Nacional de Engenharia Civil

M. C. CRUZ AZEVEDO
Engenheira, Chefe da Divisão de Dimensionamento Experimental do Laboratório Nacional de Engenharia Civil

J. BAPTISTA LOPES
Engenheiro Especialista do Serviço de Barragens do Laboratório Nacional de Engenharia Civil

RESUMO

No presente trabalho descrevem-se os principais estudos experimentais levados a cabo pelo LNEC, em colaboração com a empresa Hidro-Eléctrica do Cávado, para a definição das formas da barragem abóbada do Alto Rabagão que melhor se adaptassem à grande deformabilidade da fundação, numa das margens.

Apresentam-se, muito resumidamente, os principais resultados de um programa muito completo de estudos geotécnicos levados a cabo no local e descrevem-se os principais resultados dos ensaios sobre modelos efectuados. No total foram ensaiadas quatro definições de forma em oito modelos, nos quais se reproduziram vinte e duas fases diferentes dos estudos.

Os estudos descritos permitiram projectar uma grande barragem abóbada numa fundação assimétrica, pelo que respeita às suas propriedades mecânicas, e de grande deformabilidade numa das margens, onde o módulo de deformabilidade da fundação atingia cerca de 10 000 kgf/cm², na zona onde se apoia um grande encontro da gravidade da barragem.

Os ensaios sobre modelo revelaram que ao longo de uma margem muito deformável de uma barragem abóbada se desenvolvem tensões de tracção paralelas à fundação.

SYNOPSIS

The authors describe the main experimental studies carried out by the LNEC, in cooperation with «Hidro-Eléctrica do Cávado», in order to choose for the Alto Rabagão dam the shape best suited to the very marked deformability of its foundation in one of the banks.

The main results of a very comprehensive program of geotechnical studies carried out at the site and of the model studies are very summarily presented. On the whole, four shapes were studied in eight models in which twenty-two different phases of the studies where reproduced.

By means of the studies described, it was possible to design a large arch dam resting on a foundation asymmetrical with respect to its mechanical properties and very deformable in one of the banks, where the modulus of deformability is as low as 10 000 kgf/cm², under a large gravity abutment of the dam.

The model tests showed the occurrence of tensile stresses parallel to the foundation along one very deformable bank of an arch dam.

1 — INTRODUÇÃO

No presente trabalho são apresentadas, muito sumàriamente, as investigações empreendidas acerca da função e do comportamento estrutural da barragem do Alto Rabagão, as quais permitiram aceitar a construção de uma grande barragem abóbada sobre formações exibindo uma deformabilidade muito elevada numa das margens. Estas investigações foram empreendidas pelo LNEC em íntima colaboração com a Hidro-Eléctrica do Cávado, concessionária do aproveitamento.

A barragem do Alto Rabagão faz parte do aproveitamento hidroeléctrico do rio Cávado e do seu afluente Rabagão, no Norte de Portugal.

As obras do sistema Cávado-Rabagão foram iniciadas em 1946, tendo sido construídas até hoje as barragens de Venda Nova, Salamonde, Caniçada, Paradela, Alto Cávado e Alto Rabagão. Esta última obra, cuja construção se iniciou em 1958 e terminou em 1965, é a mais importante de todo o sistema, não só pela capacidade de produção de energia eléctrica mas também pelas suas dimensões.

A barragem é constituída por duas zonas (Fig. 1), uma em cúpula assimétrica, de dupla curvatura, apoiada em encontros artificiais, que fecha o vale principal, e outra em gravidade, que fecha um vale secundário, na margem direita, e o vale principal na margem esquerda. A altura da barragem cúpula é de 94 m e a da barragem gravidade da margem direita atinge 59 m. O desenvolvimento total do coroamento da barragem é de 1970 m, e o volume de betão da obra é de 1 129 000 m^3.

grandes profundidades, devido à caulinização dos feldspatos, acentuando-se progressivamente a alteração com a cota. Daqui resulta uma deformabilidade crescente ao longo da margem, atingindo-se na parte superior, sob o encontro, um valor muito baixo do módulo de elasticidade, cerca de 10 000 kgf/cm^2, o qual não tem sido até hoje considerado aceitável na fundação de uma grande barragem.

Estas condições de fundação exigiram a realização de um vasto programa de prospecção e de ensaios do maciço rochoso.

Quanto à prospecção da fundação da barragem abóbada, foram feitos 1000 m de sondagens e abertos 1400 m de trincheiras e valas, e 1500 m de galerias. Estes trabalhos permitiram obter uma informação muitíssimo completa sobre o maciço rochoso, ao longo da fundação e em profundidade. Em particular, foi feito um levantamento exaustivo das falhas, diaclases e outras

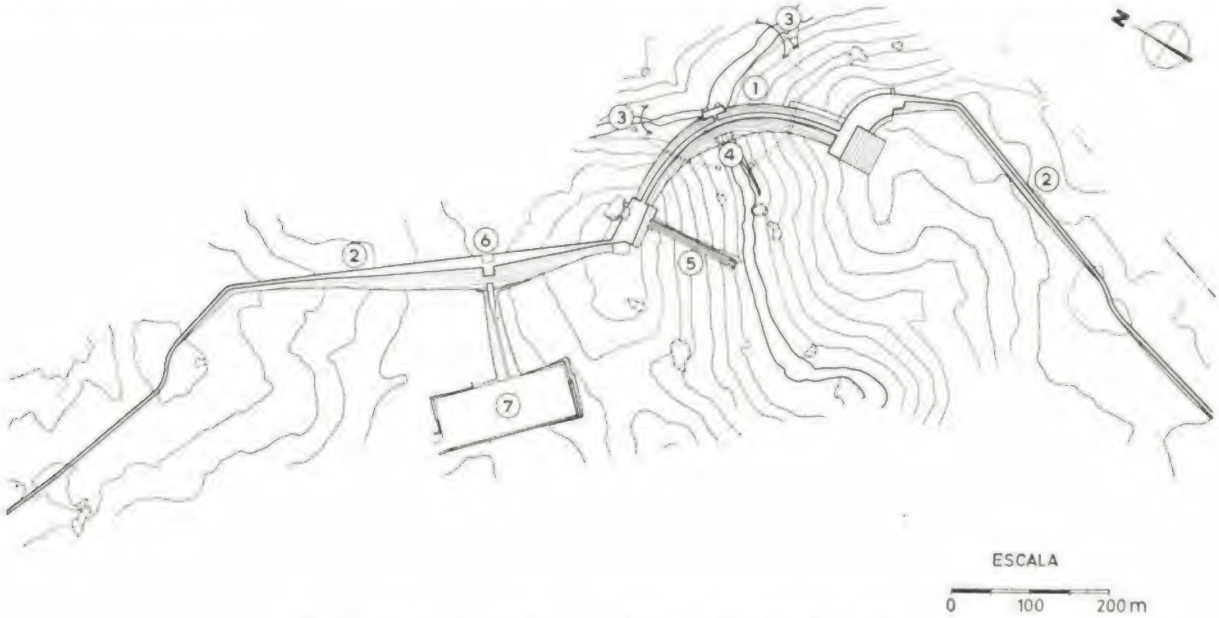


Fig. 1 — Planta geral do aproveitamento do Alto Rabagão

1) Zona em abóbada; 2) Zona em perfil de gravidade; 3) Desvios provisórios; 4) Descargas de fundo; 5) Descarregador; 6) Tomada de água; 7) Subestação e central

2 — CONDIÇÕES DE FUNDAÇÃO E ESTUDOS DO MACIÇO ROCHOSO EMPREENDIDOS

A rocha do vale principal da barragem do Alto Rabagão é um granito que exibe uma deformabilidade muito variável ao longo da superfície de fundação. De facto, enquanto que na margem direita o granito se apresenta em boa condição, na margem esquerda encontra-se alterado até

roturas. O maciço é cortado por três famílias de diaclases, sendo duas aproximadamente verticais e a outra sub-horizontal, e algumas falhas, sem grande importância. Tal como é frequente acontecer, a influência das diaclases — quer na deformabilidade quer na resistência ao corte — tornava-se menos acentuada à medida que aumentava o grau de alteração do maciço.

Foram realizados ensaios «in situ» para a

determinação da deformabilidade, incluindo a fluência, da capacidade de carga e da resistência ao corte do maciço rochoso. Além disso, foram efectuados ensaios em laboratório, para a caracterização geral da rocha. O número de ensaios realizados está indicado no Quadro I. As técnicas seguidas nos ensaios «in situ» de deformabilidade e de corte encontram-se descritas em trabalho já publicado [1]. Os ensaios para a determinação da capacidade de carga foram conduzidos sobre áreas com diâmetro tal que se conseguisse a rutura do maciço sob a força de que se dispunha, de 20 t.

QUADRO I

Ensaios geotécnicos realizados

	Tipo de ensaio	Número de ensaios
«In situ»	Deformabilidade, com fluência, sobre área de 1 m²	66
	Deformabilidade, sobre áreas com diâmetro de 25 cm	75
	Capacidade de carga sobre áreas com diâmetro de 2,8 a 10 cm	100
	Corte de secções com 70 × 70 cm	52
Em laboratório	Compressão simples de tarolos com diâmetro de 5 cm	150
	Compressão triaxial de tarolos com diâmetro de 5 cm	55
	Compressão triaxial de tarolos com diâmetro de 20 cm	17
	Índice de alteração	5500

Dada a acentuada variabilidade de propriedades ao longo da fundação e em profundidade, foi reconhecido o interesse em recorrer a um índice de qualidade da rocha, de fácil determinação em laboratório, a correlacionar com as propriedades mecânicas que interessa considerar na apreciação da segurança da estrutura. A utilização do índice visava, por um lado, a redução do número de ensaios «in situ» necessários para a caracterização do maciço e, por outro lado, a determinação expedita, no decurso dos trabalhos de escavação, das profundidades às quais as propriedades mecânicas, em especial a deformabilidade, atingiam os valores previstos no projecto, evitando-se assim as habituais apreciações subjectivas, controversas [1].

O índice de qualidade adoptado, i, foi a absorção de água de amostras da rocha, definida por [2] :

$$i = \frac{P - p}{p}$$

onde :

P — peso de uma amostra de rocha saturada
p — peso da mesma amostra seca a 105°C.

A determinação do índice de qualidade, em vários pontos de cada volume de rocha submetido a ensaios «in situ», permitiu o estabelecimento das correlações com a deformabilidade e com a resistência ao corte, apresentadas nas Figs. 2 e 3 [1].

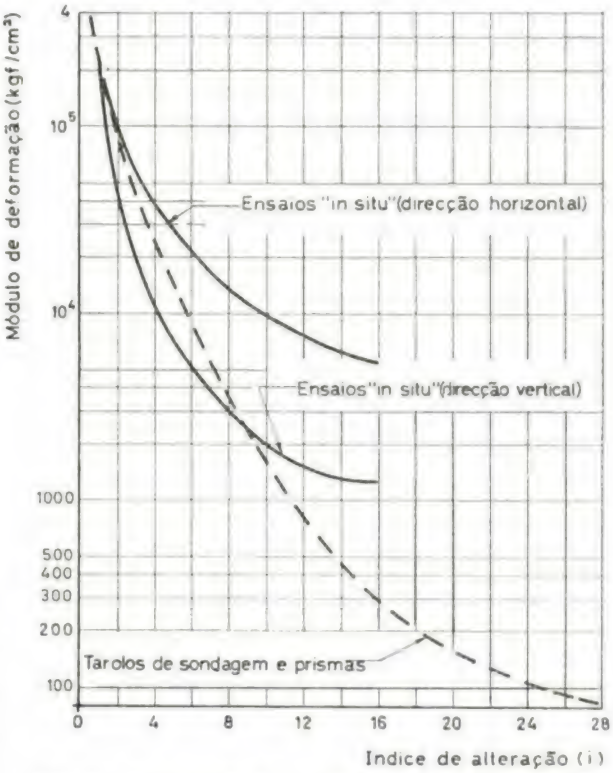


Fig. 2 — Correlações dos módulos de deformabilidade com o índice de qualidade

A deformabilidade «in situ» foi caracterizada pelo módulo de deformabilidade correspondente às tensões médias aplicadas pela barragem à fundação e tendo em consideração a fluência. Como se vê na Fig. 2, os numerosos ensaios «in situ» permitiram estabelecer correlações respeitantes aos módulos de deformabilidade obtidos mediante a aplicação de forças nas direcções horizontal e

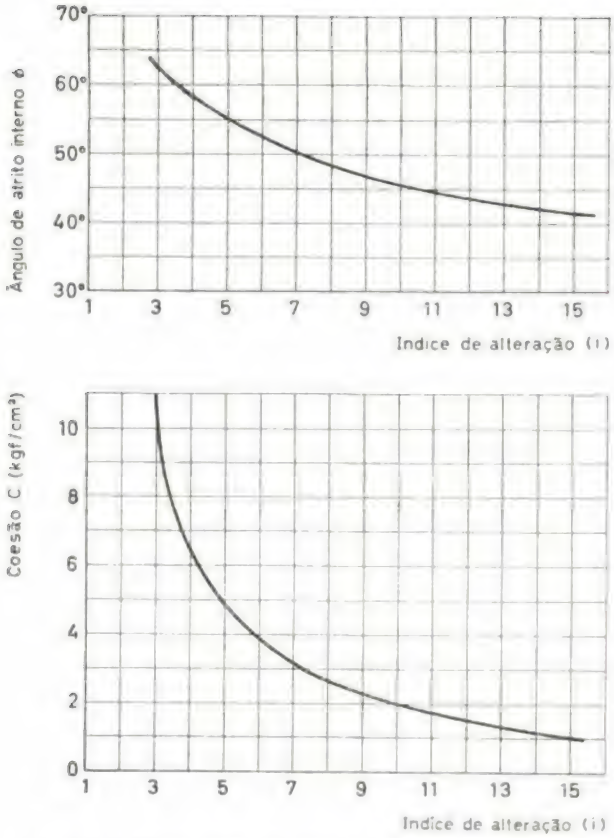


Fig. 3 — Correlações da coesão e do ângulo de atrito interno da fundação com o índice de qualidade

vertical. Verifica-se que o maciço rochoso apresenta uma anisotropia tanto mais acentuada quanto maior é o valor de i, isto é, o grau de alteração da rocha. A expansão que acompanha a alteração origina um módulo de deformabilidade na horizontal mais elevado do que na direcção vertical, atingindo a relação um valor de cerca de 4 para $i = 16$. O módulo de deformabilidade também foi determinado sobre tarolos de sondagem com inclinações iguais ou superiores a 45° e prismas, tendo-se para eles obtido a correlação indicada a traço interrompido na Fig. 2. Constata-se que para a rocha menos alterada (valores baixos de i) os módulos de deformabilidade dos tarolos e prismas se aproximam dos determinados «in situ». À medida que se acentua a alteração da rocha os valores do módulo de deformabilidade determinados sobre tarolos e prismas são mais baixos do que os observados «in situ», o que deve ser devido à perturbação dos tarolos e prismas e à falta de pressão de confinamento. Verifica-se que o módulo de deformabilidade cresce ràpidamente para valores decrescentes de i inferiores a cerca de 6.

Os ensaios de corte «in situ» permitiram obter as correlações do ângulo de atrito e da coesão com o índice de qualidade apresentadas na Fig. 3. Constata-se que, enquanto o ângulo de atrito diminui lentamente com o aumento da rocha de i, a coesão sofre uma redução brusca até valores de i de cerca de 6.

No decorrer dos trabalhos de excavação, uma vez atingida uma dada superfície, a apreciação da qualidade da rocha era feita mediante a determinação do índice de qualidade de amostras colhidas no vértices de uma rede, mais ou menos apertada conforme a heterogeneidade e o grau de alteração do maciço rochoso. Obtiveram-se assim cartas de valores de i, uma das quais é apresentada na Fig. 4.

Em face de todo o conhecimento de que se dispunha sobre o maciço rochoso e atendendo às correlações apresentadas na Fig. 2, foi estabelecido no projecto que os índices de qualidade médios da superfície de fundação não deveriam exceder os valores indicados na Fig. 5. A estes valores correspondem os módulos de deformabilidade E_f indicados, na fixação dos quais foram tidas em consideração as direcções médias das forças aplicadas pela barragem à fundação. Foram essas as deformabilidades reproduzidas na fundação dos modelos, na fase final dos estudos. Em fases anteriores foram consideradas outras condições de deformabilidade, de harmonia com o conhecimento de que se foi dispondo ao longo das demoradas investigações geotécnicas empreendidas. Observa-se que após a excavação da margem direita se reconheceu que o índice de qualidade da fundação era de facto cerca de 2,5, valor ao qual corresponde um módulo de deformabilidade de 50 000 kgf cm², isto é, mais baixo do que o considerado nos modelos.

Como se vê, trata-se de um maciço rochoso com deformabilidade muito variável ao longo da fundação, atingindo o módulo de deformabilidade o valor extremamente baixo de 10 000 kgf/cm². Nota-se que quanto mais elevada é a deformabilidade maior tem de ser a precisão com que se tem de conhecer o módulo de deformabilidade [1].

O facto de o módulo de elasticidade, E_c, do betão da barragem apresentar um valor não muito alto, é favorável ao comportamento da estrutura. Mesmo assim, a relação $\frac{E_f}{E_c}$ ainda atinge o valor $\frac{1}{20}$ sob o encontro (Fig. 5), sendo oportuno frisar

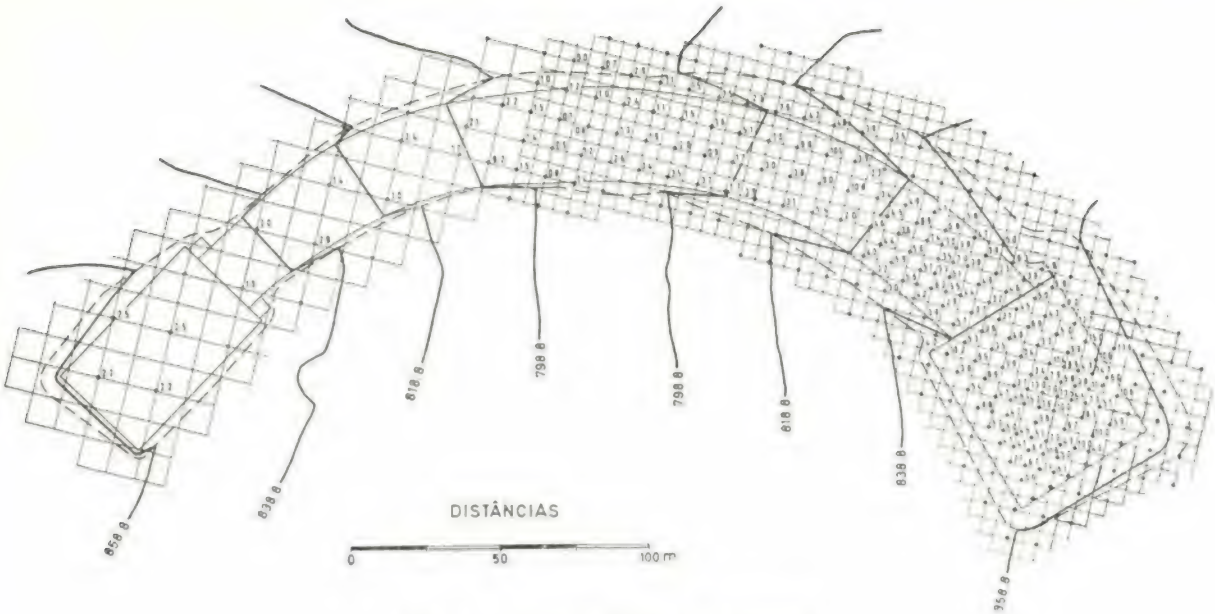


Fig. 4 — Carta de índices de qualidade

que se trata de um elemento fundamental para a segurança da obra, dado que a sua altura atinge 40 m, isto é, quase metade da altura da barragem.

Quanto aos valores considerados para o módulo de deformabilidade, refere-se que os resultados da medição dos deslocamentos da própia barragem, expostos noutro relatório apresentado a este Congresso [3], estão de acordo com os previstos pelos modelos em que se reproduziram esses valores.

Se se deseja definir um índice de qualidade para caracterizar as propriedades mecânicas do maciço rochoso, porque não escolher para esse fim em vez do índice *i* precisamente uma propriedade mecânica fácil de determinar em laboratório, utilizando pequenas amostras de rocha, tal como o módulo de elasticidade, a resistência à compressão ou a resistência ao corte? Qualquer destas propriedades é, em geral, preferível, devido a ser mais fácil obter correlações

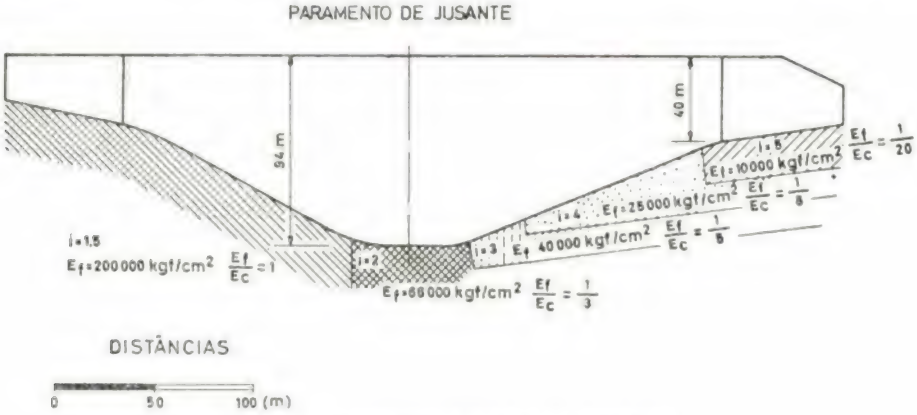


Fig. 5 — Deformabilidades da fundação

No que respeita à segurança do encontro contra o escorregamento, nota-se que mesmo para os valores mais altos do índice de qualidade o ângulo de atrito do maciço é elevado (Fig. 3), não se pondo pois problema, mesmo desprezando a coesão.

mais perfeitas entre os valores determinados em laboratório e «in situ». A nossa experiência mostra que o índice *i* apresenta sòmente a vantagem de poder ser usado no caso de rochas muito alteradas, como acontecia no maciço rochoso em consideração, ou rochas cuja estrutura

é tal que é difícil ou mesmo impossível extrair amostras para ensaios mecânicos. De outro modo, é preferível recorrer à determinação de uma propriedade mecânica em laboratório, apesar da determinação de i ser mais simples.

3 — TRAÇADOS DAS BARRAGENS ESTUDADOS

Os numerosíssimos estudos sobre modelo que temos empreendido acerca da influência da deformabilidade das fundações no estado de tensão de barragens de betão, mostram que essa influência se torna, em regra, muito importante para valores de $\frac{E_f}{E_c}$ inferiores a $\frac{1}{8}$ [1]. Além disso, é de esperar que — sobretudo junto das fundações, onde se desenvolvem em regra as tensões mais elevadas — a precisão dos resultados fornecidos pelos métodos analíticos piora à medida que decresce $\frac{E_f}{E_c}$.

Deste modo, dada a importância da obra e a carência de conhecimentos sobre o comportamento de barragens abóbada fundadas sobre maciços muito deformáveis como o presente, no qual $\frac{E_f}{E_c}$ atingia o valor $\frac{1}{20}$, estava-se perante uma situação na qual o projecto não podia deixar de se apoiar essencialmente em estudos sobre modelo. Com estes estudos não teria sido possível aceitar, com a indispensável confiança, a construção da obra.

Foi empreendido um vasto programa de estudos sobre modelo, ao longo dos quais o traçado da barragem, incluída a sua altura, foi evoluindo, de modo a adaptá-lo às sucessivas condições de fundação que foram consideradas. No Quadro II estão indicadas as características dos modelos ensaiados. Os quatro traçados fundamentais foram estudados em 8 modelos de gesso-diatomite e cada um destes ensaiado em sucessivas fases. Deste modo, foram investigadas 22 situações diferentes, no que respeita às formas, às condições de fundação e à altura da estrutura. As técnicas seguidas foram as comuns no LNEC [4] [5]. No que respeita à fundação dos modelos, para reproduzir os valores mais baixos de $\frac{E_f}{E_c}$ teve de se recorrer a plásticos. Vai passar a fazer-se uma descrição, muito sumária, dos estudos empreendidos, com vista a apresentar os resultados com interesse geral obtidos.

O estudo experimental constou essencialmente de duas partes. Na primeira foi estudado sobre três modelos o primeiro traçado da barragem (Fig. 6), estabelecido quando não se dispunha ainda de um conhecimento aprofundado das condições de fundação. O estudo deste traçado, correspondente à altura da barragem de 102,8 m, revelou que para a fundação com os valores mais baixos de $\frac{E_f}{E_c}$ se desenvolvem tensões de tracções de valor elevado na face de jusante, junto à fundação da margem esquerda, e com direcção paralela à superfície de fundação e tracções a montante junto da margem direita. O fenómeno de ocorrência das tracções paralelas à fundação, até então desconhecido e que não pode ser evidenciado pelos métodos de cálculo existentes, deve ser consequência da acentuada variação dos deslocamentos radiais ao longo da fundação, em resultado da grande deformabilidade do maciço rochoso.

Na segunda parte do estudo ensaiaram-se consecutivamente três novos traçados (Fig. 6) estabelecidos com vista a reduzir o valor das referidas tracções a jusante e também a montante. Destes traçados, os dois primeiros tinham inicialmente a altura de 94 m e o último a altura de 102,8 m. Nos cinco modelos nos quais foram estudados estes três traçados reproduziram-se as deformabilidades definidas após conclusão dos estudos geotécnicos.

Quer na primeira quer na segunda parte do estudo, os traçados considerados sofreram certas alterações locais, sugeridas pelos resultados dos ensaios, conforme está indicado no Quadro II.

Apresentam-se a seguir os estados de tensão devidos à acção da pressão hidrostática actuando até ao nível do coroamento da barragem.

3.1 — Primeiro traçado *(shape)*

Na primeira fase do estudo considerou-se $\frac{E_f}{E_c} = 1$, tendo-se observado uma distribuição de tensões na barragem com as direcções e grandezas habituais. A redução, no modelo II, do valor de $\frac{E_f}{E_c}$ para $\frac{1}{4}$ na margem esquerda, confor-

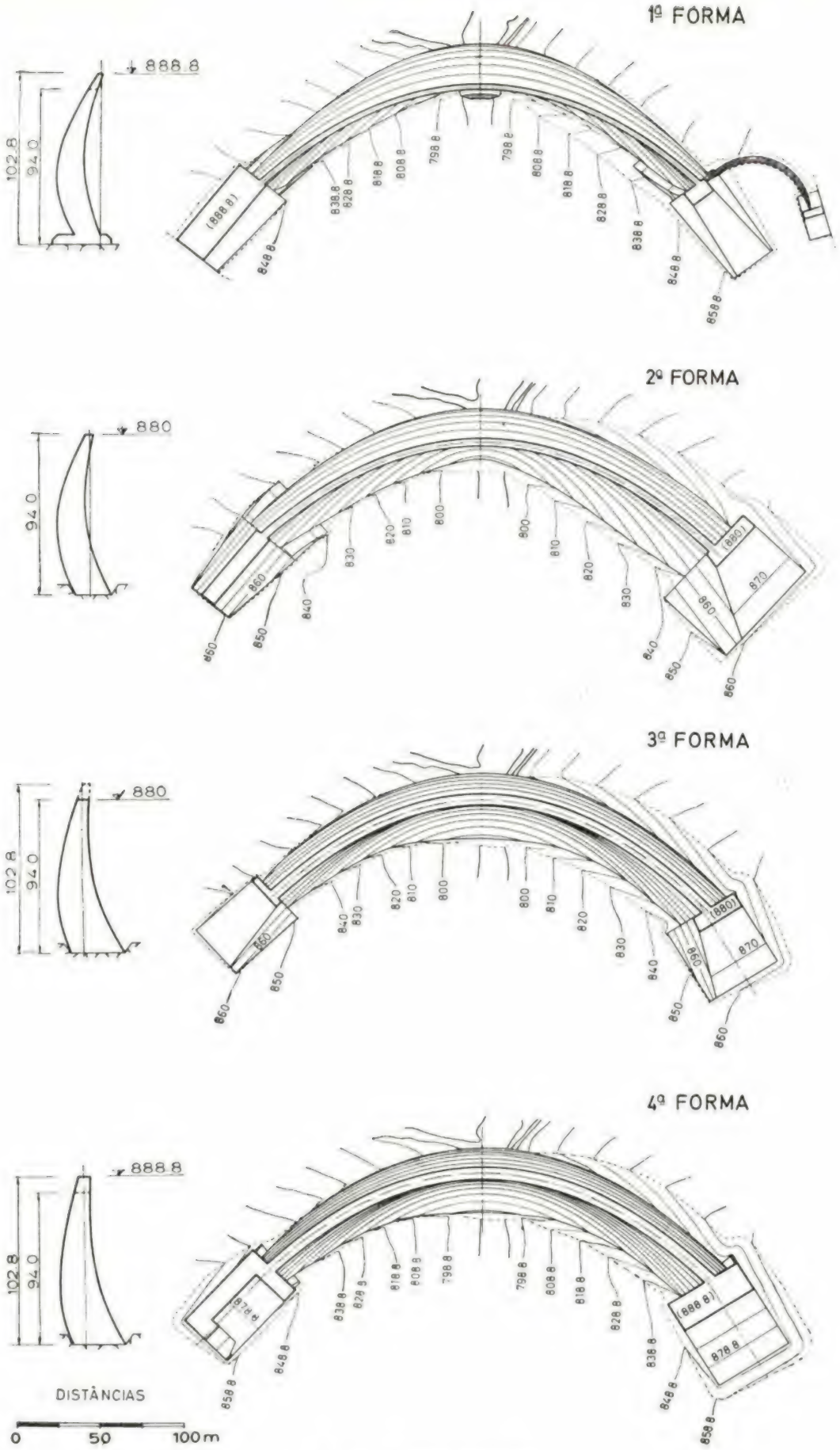


Fig. 6 — Formas ensaiadas

QUADRO II — *Características dos modelos ensaiados*

Forma	Volume de betão (m^3)	Modelo	Fase	Altura da barragem (m)	Módulos de elasticidade da fundação	Alteração em relação à fase anterior
1.ª	500,000	I	1.ª	102,80	toda a fundação: $E_f = E_c$ *	—
			2.ª			fundação da margem esquerda separada da fundação a jusante
			3.ª		margem direita $E_f = E_c$ margem esquerda: $E_f = \frac{1}{15} E_c$ abaixo de 830 m $E_f = \frac{1}{30} E_c$ acima de 830 m	alteração nos módulos de elasticidade da fundação
		II	—	102,80	margem direita: $E_f = E_c$ margem esquerda: $E_f = \frac{1}{4} E_c$	—
		III	1.ª	102,80	margem direita: $E_f = E_c$ margem esquerda: $E_f = \frac{1}{4} E_c$	—
			2.ª		margem direita: $E_f = E_c$ margem esquerda: $E_f = \frac{1}{10} E_c$ abaixo de 830 m	alteração nos módulos de elasticidade da fundação
			3.ª		$E_f = \frac{1}{25} E_c$ acima de 830 m	cortes verticais junto da fundação da margem esquerda a jusante
	—		4.ª	94,00		alteração da cota do coroamento
2.ª	530,000	IV	1.ª	94,00	margem direita: $E_f = E_c$ acima de 790 m	—
			2.ª		$E_f = \frac{1}{3} E_c$ abaixo de 790 m	1.º corte do paramento de jusante
			3.ª			2.º corte do paramento de jusante
			4.ª		margem esquerda: $E_f = \frac{1}{3} E_c$ abaixo de 790 m	3.º corte do paramento de jusante
3.ª	550,000	V	1.ª	94,00		—
	—		2.ª	102,80	$E_f = \frac{1}{5} E_c$ entre 790 m e 800 m	alteração da cota do coroamento
			3.ª			corte do encontro da margem esquerda
	550,000		4.ª	94,00	$E_f = \frac{1}{8} E_c$ entre 800 m e 830 m	alteração da cota do coroamento: alteração no encontro da margem esquerda: 1.º corte do paramento de montante
			5.ª		$E_f = \frac{1}{20} E_c$ acima de 830 m	2.º corte do paramento de montante
		VI	1.ª	94,00		—
	—		2.ª	102,80		alteração da cota do coroamento
4.ª	690.000	VII	—	102,80		—
		VIII	1.ª	102,80		—
	—		2.ª	94,00		alteração da cota do coroamento

* E_c Modulo de elasticidade do betão da barragem.

me aconselhavam os resultados dos estudos geotécnicos até então obtidos, não acarretou modificações importantes do estado de tensão. Tal como se tem observado noutros casos, as grandezas das tensões máximas, quer de compressão quer de tracção, sofreram variações que não excederam 20 %.

Quando, na terceira fase do estudo do modelo I, se reproduziram na margem esquerda os valores de $\frac{E_f}{E_c}$ de $\frac{1}{15}$ e $\frac{1}{30}$, verificou-se uma profunda modificação do estado de tensão, quer no respeitante a direcções quer a grandezas. Como se vê na Fig. 7, apesar do valor ser aproximadamente simétrico, o estado de tensão é profundamente assimétrico. A distribuição das tensões na face de montante, junto à fundação, é muito diversa nas duas margens, desenvolvendo-se na margem direita elevadas tensões de tracção, que atingem o valor de 42 kgf/cm². Por outro lado, as compressões na face de jusante, junto à fundação, são também mais elevadas na margem direita, o que revela uma flexão de conjunto da barragem, devida aos grandes deslocamentos da margem esquerda. Além disso, ocorre a jusante, junto à fundação na margem esquerda, o fenómeno já atrás referido: aparecimento de tracções paralelas à fundação, cuja grandeza atinge o valor de 49 kgf/cm². Outro facto digno de ser assinalado é o aumento do valor das tensões no encontro da margem esquerda, o que revela uma transferência de carga para os arcos superiores.

O aumento dos valores do módulo de elasticidade da fundação, considerado na segunda fase do estudo do modelo III (Quadro II), correspondente a $\frac{E_f}{E_c}$ igual a $\frac{1}{10}$ e $\frac{1}{25}$ não modificou especialmente o estado de tensão, como seria de esperar.

Feita a composição das tracções junto à fundação, na margem direita a montante e na margem esquerda a jusante, com as compressões devidas ao peso próprio verificou-se que subsistiam tracções com valor elevado.

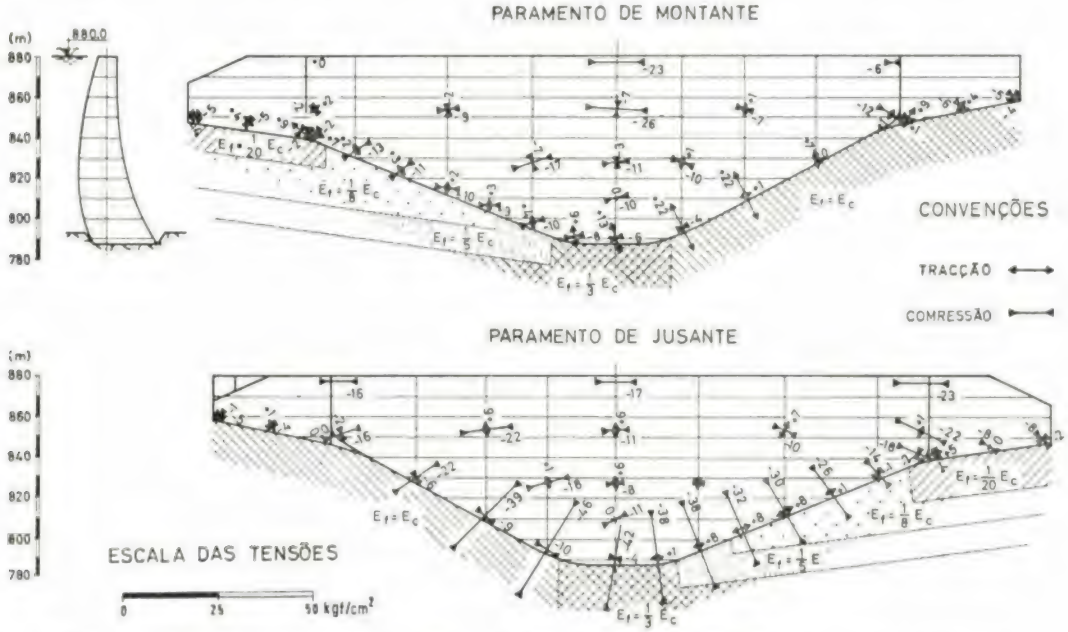


Fig. 7 — Principais tensões no protótipo devidas à pressão hidrostática (modelo I, 3.ª fase)

Os valores das compressões eram baixos em todas as fases consideradas.

Uma questão que importa sempre investigar quando se desenvolvem tracções numa barragem é se elas tendem a desaparecer uma vez que se fendilhe a zona traccionada. A nossa experiência tem mostrado que as tensões de tracção que frequentemente se desenvolvem, a montante junto à fundação de barragens abóbada, tendem a evanescer à medida que aumenta a profundidade de fendas que ocorram. Para averiguar a repercussão de fendas que se produzissem como

resultado das tracções de jusante atrás referidas, foram abertas no modelo fendas verticais na zona em tracção, isto é, com a direcção das juntas entre os blocos da barragem (Quadro II), tendo-se verificado um agravamento geral do estado de tensão da barragem. Aumentou não só o valor das tracções a montante junto à fun-

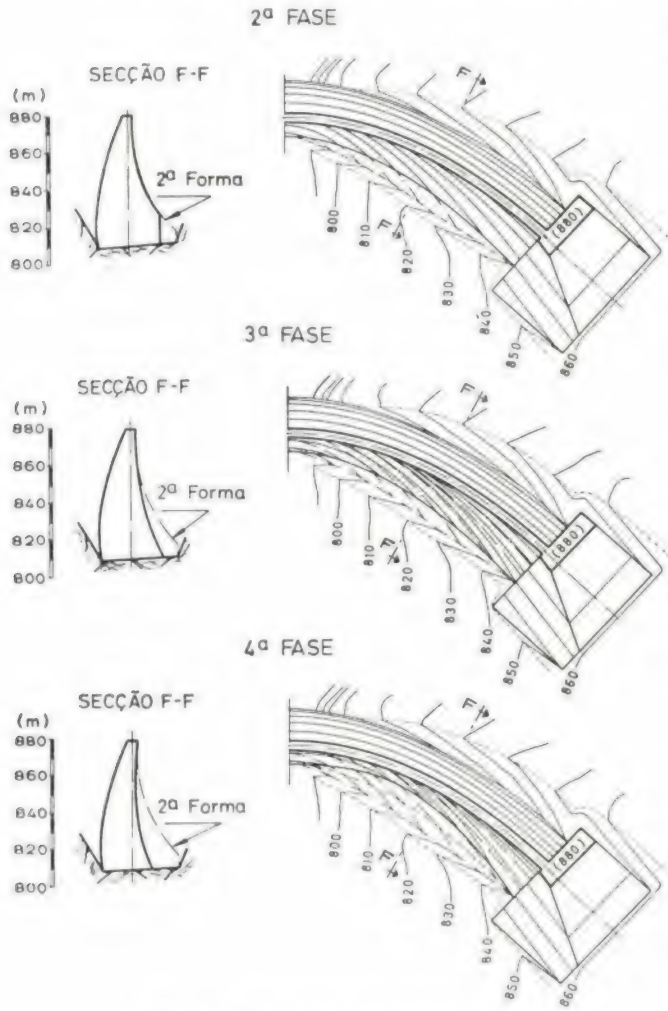


Fig. 8 — Fases do estudo da 2.ª forma

dação na margem direita mas também a compressão máxima. Tirou-se pois a conclusão de que a fissuração tinha de ser evitada.

Numa última fase do estudo do primeiro traçado a altura da barragem foi reduzida para 94 m. Verificou-se uma redução dos valores das tensões, subsistindo contudo ainda tracções excessivas.

Deste modo se foi conduzido aos restantes traçados correspondentes a volumes de betão bastante mais elevados, como se vê no Quadro II. Ao comparar os volumes do primeiro traçado com os correspondentes ao segundo e terceiro é necessário notar que a altura da barragem é reduzida de 102,8 m para 94 m. Como esta redução é de cerca de 8 %, o volume de uma barragem com a altura de 94 m, projectada segundo os mesmos critérios adoptados no primeiro traçado, seria cerca de 24 % menor, isto é, 380 000 m³. Portanto o aumento de volume do primeiro para o segundo e terceiro traçados, imposto pela elevada deformabilidade das fundações, atinge quase 50 %.

3.2 — Segundo traçado

Com o objectivo de reduzir as tracções a jusante e a montante, neste traçado (Fig. 6), acentuadamente assimétrico, a espessura da barragem na margem esquerda, incluído o encontro, é muito maior (Fig. 8) e a altura da barragem foi reduzida de 8,5 m.

O ensaio deste traçado revelou que ainda subsistiam tracções que atingiam 20 kgf/cm² a jusante e 30 kgf/cm² a montante na margem direita, apesar do substancial aumento da espessura. Como neste traçado a curvatura, em planta, da inserção da barragem no terreno era pràticamente nula, pensou-se que as tracções resultariam de uma flexão de eixo perpendicular à fundação. Por isso, nas segunda, terceira e quarta fases do ensaio do modelo IV (Quadro II) foram feitos cortes, de profundidade variável no paramento de jusante, para um e outro lado da secção F-F (Fig. 8), com vista a conferir uma curvatura, em planta, ao paramento e também a eliminar a própria zona traccionada. Verificou-se, contudo, que o valor das tracções aumentou com cada um dos cortes, atingindo na quarta fase o valor de 37 kgf/cm². Além disso, no encontro da margem esquerda apareceram tensões de tracção mais elevadas, que não eram compensadas pelo peso próprio.

Concluiu-se pois que o fenómeno da ocorrência de tracções paralelas à fundação não era comandado sòmente pelas formas e espessuras da barragem na zona onde elas se desenvolvem.

3.3 — Terceiro traçado

Foi por isso escolhido novo traçado em que se procurou aumentar a curvatura da inserção da barragem na fundação e se aumentaram as

espessuras em toda a abóbada, em relação ao primeiro traçado (Fig. 6). O traçado em consideração apresenta uma certa assimetria, sendo mais espessa a barragem na margem esquerda.

Os resultados obtidos na primeira fase do ensaio do modelo V (Quadro II) estão apresentados na Fig. 9. Como se vê, as máximas compressões em ambos os paramentos têm valores baixos. Após composição com o efeito do peso próprio, subsistia a montante na margem direita, junto à fundação, uma tracção de 7 kgf/cm², e a jusante junto da fundação na margem esquerda uma tracção de 9 kgf/cm² (nesta zona a influência do peso é muito pequena).

geiramento do encontro, substituindo este por um prolongamento da abóbada com as espessuras que tinha na secção de ligação ao encontro (Fig. 10). Não se verificou alteração apreciável do estado de tensão da estrutura, salvo, como era de prever, na zona correspondente ao encontro.

Os resultados obtidos aconselharam a regressar à altura de 94 m e a procurar melhorar o traçado. Foram então ensaiadas as duas modificações apresentadas na fig. 10, correspondentes à quarta e quinta fases do ensaio do modelo V (Quadro II). Foi dado á barragem um maior desaprumo a montante na margem direita, junto à fundação, a fim de reduzir o valor das trac-

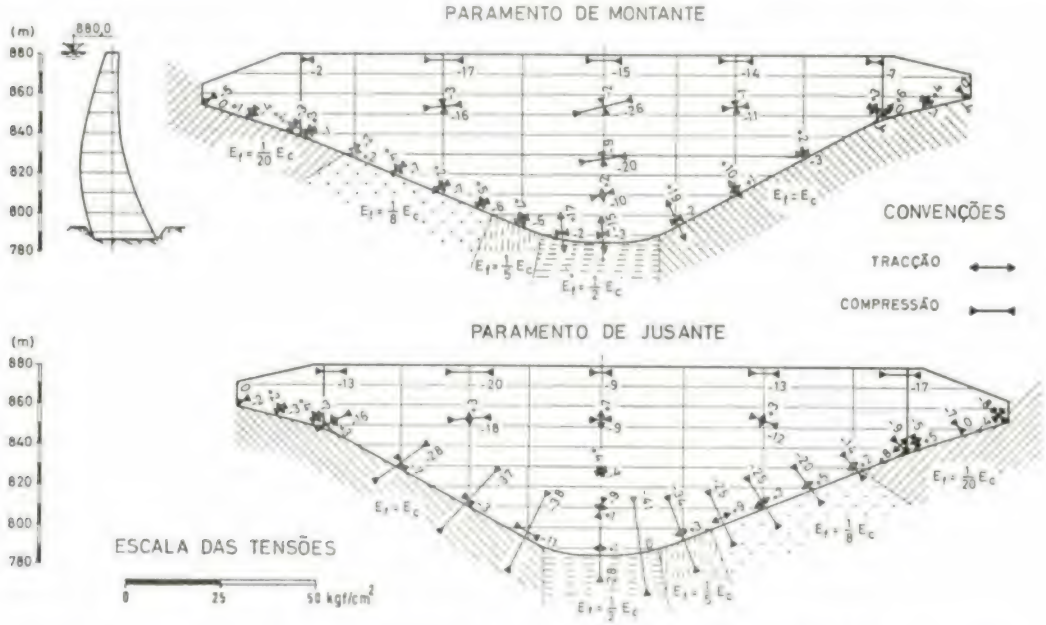


Fig. 9 — Principais tensões no protótipo devidas à pressão hidrostática (modelo VI, 1.ª fase)

Como os valores destas tracções foram considerados aceitáveis, decidiu-se considerar aumentar de 8,5 m a altura da barragem (Quadro II), mantendo a definição de formas. Os resultados não foram satisfatórios pois que as tracções máximas devidas ao efeito da pressão hidrostática passaram de 19 para 32 kgf/cm² a montante, e de 9 para 16 kgf/cm² a jusante. A compressão máxima aumentou de 20 kgf/cm².

Supôs-se a certa altura que as elevadas tracções a jusante fossem devidas a uma rigidez excessiva do encontro da margem esquerda, donde resultaria que a barragem se apoiaria essencialmente no fundo do vale e nesse encontro. Foi por isso investigada a influência do ali-

ções. Este intuito foi alcançado, pois a tracção máxima reduziu-se a 3 kgf/cm² após consideração do peso próprio.

3.4 — Quarto traçado

Em face dos resultados aceitáveis obtidos nos ensaios do traçado anterior, foi definido um novo traçado, com a altura de 102,8 m (Fig. 6).

Os ensaios realizados mostraram que este traçado não era satisfatório, em virtude dos elevados valores das tracções junto à fundação, a montante e a jusante (Fig. 11). Efectivamente, a montante após conferição com o efeito do peso próprio, a tracção de 33 kgf/cm² sòmente era

reduzida para 17 kgf/cm² valor este não considerado aceitável, e a jusante atingia-se a tracção de 11 kgf/cm². Por outro lado, nos encontros também se observaram tracções que não eram compensadas pelo peso próprio.

foi reconhecido que, dadas as condições de fundação, em todos os traçados com a altura de 102,8 m se desenvolviam tensões de tracção consideradas excessivas e que para a altura de 94 m o terceiro traçado era o mais favorável. Entretanto

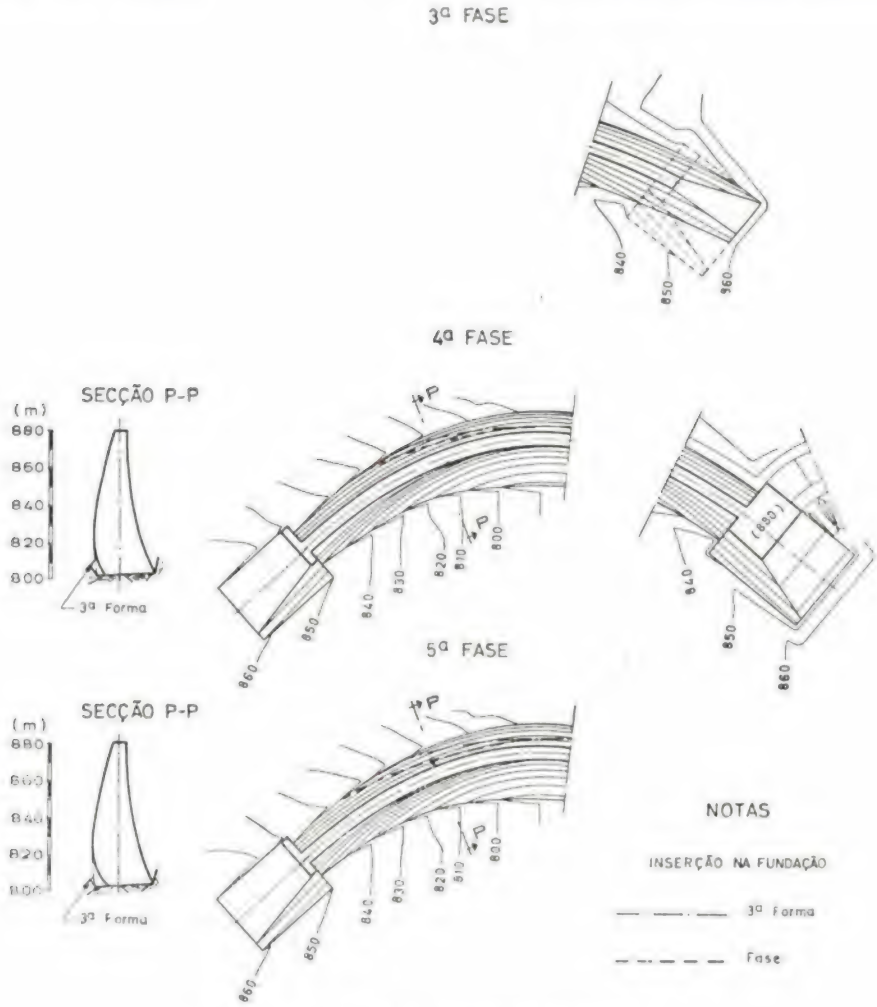


Fig. 10 — Fases do estudo da 3.ª forma

Em face destes resultados, na segunda fase do ensaio do modelo VIII este foi cortado de modo a reproduzir-se uma vez mais a altura de 94 m. Como se vê na Fig. 12, as tensões, incluídas as de tracção, sofreram uma certa redução, quer na abóbada quer nos encontros.

Nesta última fase dos estudos foi feita a medição dos deslocamentos radiais da barragem. Constatou-se uma acentuada assimetria da deformação da abóbada e uma rotação de eixo vertical do encontro da margem esquerda, em torno da inserção da abóbada no encontro.

Terminadas as exaustivas investigações sobre modelo cuja sumária descrição acaba de ser feita, estudos mais completos da economia do aproveitamento mostraram não haver interesse em insistir na solução com a altura de 102,8 m, a qual teria exigido ainda um incremento geral das espessuras da abóbada, Foi o terceiro traçado ensaiado que serviu de base à Hidro-Eléctrica do Cávado para a definição final das formas da barragem, as quais só diferem desse traçado por ter sido dado um certo aumento de curvatura aos arcos inferiores e incrementado um pouco o volume dos encontros.

Em virtude dos modelos terem revelado que a ocorrência de fendas na zona traccionada a jusante agravava o estado de tensão da barragem,

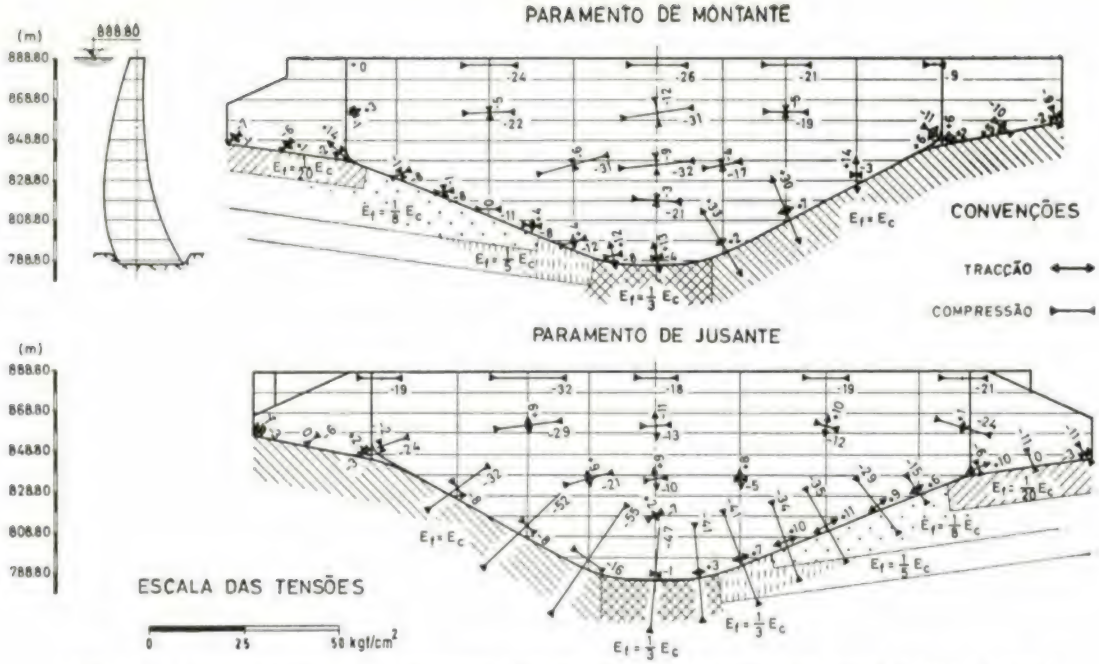


Fig. 11 — Principais tensões no protótipo devidas à pressão hidrostática (modelo VIII, 1.ª fase)

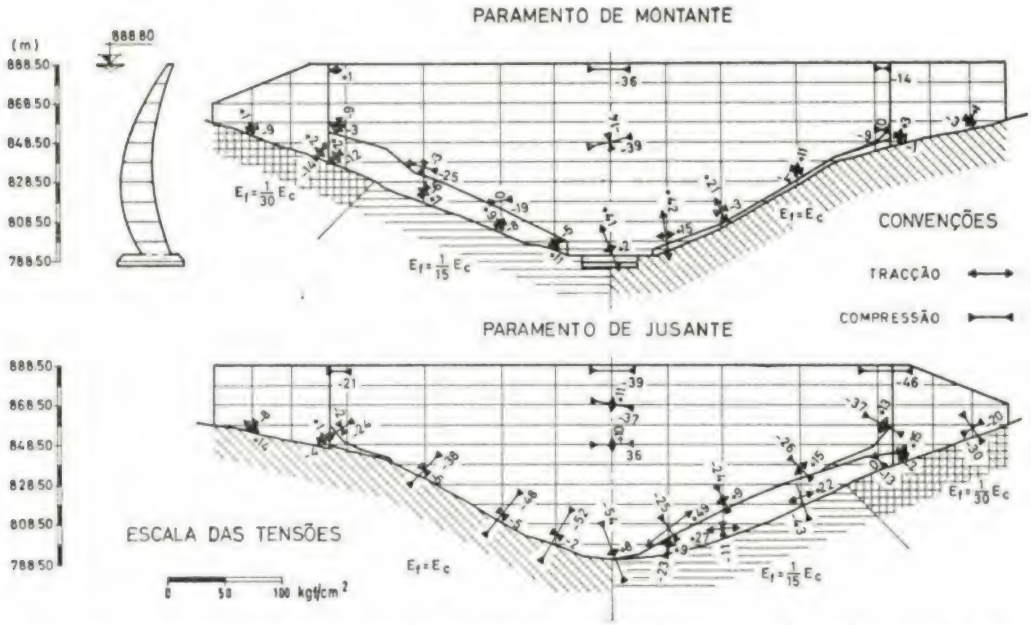


Fig. 12 — Principais tensões no protótipo devidas à pressão hidrostática (modelo VIII, 2.ª fase)

na construção foram colocadas armaduras dispostas paralelamente à fundação, e até à distância da fase de jusante à qual ocorriam tracções, com a secção necessária para suportarem por si as tensões indicadas pelos estudos experimentais. Para isso tiveram de ser construídas juntas alargadas, nas quais se fazia a sobreposição das armaduras dos dois blocos vizinhos.

4 — CONCLUSÕES

As investigações referidas no presente trabalho e a observação do comportamento da obra [3] demonstraram a possibilidade de, com inteira segurança, ser construída uma grande barragem abóbada sobre uma fundação com muito elevada deformabilidade. Segundo o nosso conhecimento,

a barragem do Alto Rabagão é a primeira construída até hoje em que se aceitaram, com perfeito conhecimento da situação, tão baixos módulos de deformabilidade em extensas zonas da fundação.

Os estudos sobre modelo revelaram que a muito elevada deformabilidade de uma das margens dá origem a importantes tensões de tracção na vizinhança dessa margem, de direcção paralela à fundação. Este fenónemo, que não era conhecido, evidencia bem o importante papel desempenhado pelos modelos quando se está perante condições que não são correntes. Por outro lado, as numerosas tentativas infrutíferas que foram feitas, em diversas fases dos estudos, para reduzir os valores das referidas tracções mostraram-nos, mais uma vez, a insuficiência da intuição. A conclusão geral que se tirou foi de que só era possível reduzir as tracções desde que se procedesse a um aumento geral das espessuras da barragem. Mesmo assim, foi reconhecida a necessidade de dispor de armaduras para absorver as tracções que subsistiam.

A elevada deformabilidade de uma das margens origina também tracções importantes na margem oposta, a montante. Foi, no entanto, possível encontrar formas tais que o peso próprio compensasse quase completamente estas tracções.

No que respeita à adopção pela Hidro-Eléctrica do Cávado de uma barragem de betão, observa-se que não se dispunha, a distância aceitável, de terra para a construção de uma barragem de terra ou para constituir o órgão de estanquidade de uma barragem de enrocamento. Uma solução de enrocamento com cortina de betão a montante foi posta de parte em virtude da natureza da exploração do reservatório não se adequar à necessidade do esvaziamento para eventual separação da cortina. Os autores do projecto também puseram de parte uma solução de contrafortes em consequência de estes terem de se desenvolver até uma zona, a jusante da obra actual, que não oferecia as necessárias condições de fundação. Além disso, o seu volume seria certamente superior ao da solução adoptada.

Quanto à adopção de soluções de gravidade, maciças ou aligeiradas, nota-se que, além de não serem económicas, dado o maior volume de betão uma barragem abóbada apresenta uma segurança em relação à rotura muito maior, quer no respeitante à rotura pela barragem pròpriamente dita quer pelas funções. Além disso, não consideramos, contràriamente a um ponto de vista muito comum, que uma barragem abóbada exija melhores condições de fundação, quer do ponto de vista de deformabilidade quer de resistência, do que uma solução gravidade. De facto, salvo casos singulares, não é possível, no estado actual dos conhecimentos, distinguir entre as aptidões de uma formação para suportar uma barragem abóbada e uma barragem gravidade, tanto mais que é sempre possível reduzir substancialmente as tensões descarregadas sobre a fundação por uma abóbada, mediante a criação de um soco de fundação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Hidro-Eléctrica do Cávado a autorização para publicação dos resultados dos vários estudos efectuados, assim como a colaboração prestada durante a sua realização. Agradece-se igualmente a todo o pessoal do Serviço de Barragens que colaborou nos estudos a ajuda na preparação deste trabalho.

BIBLIOGRAFIA

[1] Rocha, M. — *Mechanical behaviour of rock foundations in concrete dams.* 8th Congress on Large Dams. Question 28.
Report 44 Edinburgh, 1964.

[2] Hamrol, A. — *A quantitative classification of the weathering and weatherability of rocks.* 5th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering. Vol. II. Paris, 1961.

[3] Rocha, M., Silveira, A. F., Rodrigues, O. V., Florentino, C., — *Assessment of the behaviour of a large dam during its first loading.* Report presented to the 9th Congress on Large Dams. Question 34.

[4] Cruz Azevedo, M. C., Ferreira, E. — *Construction of models of dams for elastic tests.* Symposium on Concrete Dams Models. Report 26. Lisbon. 1963.

[5] Serafim, J. L., Cruz Azevedo, M. C. — *Methods in use at the LNEC for the stress analysis in models of dams.* Bulletin Rilem n.º 11. Juin 1961.

CONSTRUÇÕES TÉCNICAS, LDA.

PRAÇA DO MUNICÍPIO, 13-3.º — LISBOA 2 • TEL. 36 65 06

SONDAGENS • FUNDAÇÕES
TRABALHOS MARÍTIMOS
PONTES E ESTRUTURAS

SOCIEDADE CENTRAL DE CERVEJAS

Silo para 20 000 t de cereal, na nova fábrica de cerveja em Vialonga, executado com moldes deslizantes

Execução de CONSTRUÇÕES TÉCNICAS, LDA.

ESTAMPARIAS TINTURARIAS LAVANDARIAS

PARA OS VOSSOS TECIDOS TÉCNICOS:
TRANSPORTADORES, MANCHONS, LAPPING, WOLFRIES,
FLANELAS, CANEVAS, ETC.,

EM FIBRAS NATURAIS OU SINTÉTICAS

CONSULTEM:

FANAFEL

FÁBRICA NACIONAL DE FELTROS INDUSTRIAIS
SOCIEDADE LIMITADA

APART.: 9
TELEFS.: 52093-52094
TELEG.: FELTROS

OVAR
PORTUGAL

ESCRITÓRIO E FÁBRICA
ESTRADA DE S. JOÃO

Empresa Ultramarina de Sondagens e Fundações, L.da

(SONDADORA)

SONDAGENS geológicas e geotécnicas — CAPTAÇÕES de águas subterrâneas — REBAIXAMENTOS do nível freático — CONSOLIDAÇÕES E ESTABILIZAÇÃO do solo — INJECÇÕES DE CIMENTO e outros produtos — INFRAESTRUTURAS de barragens, túneis e pontes — FUNDAÇÕES de todos os tipos

Única Empresa da especialidade com sede no Ultramar Português

DELEGAÇÃO - LISBOA
R.S.Pedro de Alcântara, 1
Tel. 32 46 93 e 21 32 56

SEDE - LUANDA
Rua Serpa Pinto, 60
C.P.2178 - Tel.4226

MOÇAMBIQUE
L.Marques - C.P.982 - Tel.741121
Beira - C.P. 1002 - Tel. 71497

C. D. U. 388.1

BENEFÍCIOS ECONÓMICO-SOCIAIS DAS AUTO-ESTRADAS

por A. D. FERREIRA DO NASCIMENTO
Eng.º Civil (U. P.)
Eng.º de Tráfego (M. E. U., da Califórnia)

RESUMO

A fim de se avaliarem os benefícios directos para os usuários resultantes da construção do troço Sacavém-Vila Franca da Auto-Estrada do Norte, procedeu-se à determinação dos consumos de combustível e dos tempos de percurso na antiga estrada (N 10) antes da inauguração da referida auto-estrada, e nesta dois anos depois.

Estimadas as economias em custo de operação, tempo de percurso, acidentes, comodidade e conveniência, determinaram-se os benefícios para a comunidade, verificando-se que: a) Os benefícios resultantes do menor custo de operação, menor tempo de percurso e menor número de acidentes correspondem a uma rentabilidade económica de 12 °/₀ no período de 1962-1981. Considerando o valor económico da comodidade e conveniência, esta rentabilidade no mesmo período, será de 20 °/₀; b) As receitas da portagem permitirão amortizar o empreendimento em vinte anos, com uma taxa de juro superior a 6 °/₀.

Haveria ainda a considerar os benefícios para os usuários da antiga estrada, devidos à diminuição do tráfego médio diário, assim como para as propriedades marginais devidos a menores ruidos e menor poluição.

SYNOPSIS

In order to estimate the user's benefits due the construction of the Sacavem — Vila Franca section of the Auto-Estrada do Norte (North's Freeway) tests were carried out regarding savings on fuel consumption and travel time. Once estimated the value of savings on vehicle-operating costs, travel time, accidents, as well as the value of comfort and convenience, the couclusions was the following:

a) The ecomic benefits due savings ou vehicle-operating costs, travel time and accidents are equivalent of a rate of return of 12 °/₀ during the period 1962-1981. Taking in account the economic value of comfort and convenience the rate of return should be 20 °/₀; b) The revenues of the toll rates would re-pay the original costs and maintenance costs (plus accumulated interest greater than °/₀) in twenty years.

Secundary benefits like savings for those remaining on the old road, and reductiou in noise, smell, etc. for persons living there was not considered in the study, what sugests under-valuation of the freeway.

1 — GENERALIDADES

A maioria das estradas existentes resultam de sucessivas melhorias introduzidas em estradas construídas anteriormente à grande expansão do automóvel, que teve lugar após a I Guerra Mundial, de modo a adaptá-las ao novo meio de transporte.

No entanto, essa adaptação, assim como a construção de novas estradas, foi efectuada durante muitos anos segundo métodos empíricos, o que teve como consequência a deterioração rápida das mesmas e o agravamento progressivo dos seus defeitos iniciais, devidos principalmente a características geométricas obsoletas.

Os efeitos sociais e económicos desta situação exprimem-se por taxas de acidentes e perdas de tempo inadmissíveis, seja qual for o aspecto por que se encarem.

Verifica-se, portanto, que as dificuldades da circulação são devidas essencialmente à enorme disparidade que existe entre o veículo moderno que é o automóvel e os traçados inadequados que utiliza, tanto nas zonas rurais como urbanas. Consequentemente, a solução lógica será construir estradas só para os veículos automóveis, com características geométricas que permitam a circulação com comodidade e segurança. Não basta porém construir estradas com as caracteríticas geométricas indispensáveis e proibir a circulação de velocípedes, peões e veículos de tracção animal. Para que a circulação se faça com comodidade e segurança é necessário que não haja acessos às propriedades marginais.

Com efeito, a circulação exclusiva de veículos automóveis e o controle de acessos são os únicos meios de assegurar uma circulação cómoda, rápida e segura.

Além disso, o controle de acessos assegura a máxima rentabilidade dos investimentos rodoviários pois as condições iniciais de circulação serão mantidas enquanto a sua capacidade o permitir. Pelo contrário, como é do conhecimento geral, a progressiva urbanização dos terrenos

marginais torna ràpidamente obsoletas as novas construções rodoviárias, anulando a rentabilidade do respectivo investimento.

A aceitação destes postulados teve como consequência a construção das primeiras auto-estradas nos anos vinte. Define-se normalmente como auto-estrada uma via de comunicação destinada exclusivamente a veículos automóveis, com faixas de rodagem independentes para cada sentido de circulação, sem acessos às propriedades marginais e sem cruzamentos de nível. Esclarece-se, porém, que as primeiras auto-estradas que se construiram tinham uma única faixa de rodagem com duas ou três vias, o que era aceitável devido aos volumes de tráfego aerem diminutos.

Como é óbvio, estradas com duas vias são inadequadas para os elevados volumes de tráfego que se verificam actualmente nas regiões metropolitanas, assim como nos itinerários principais das zonas rurais. No entanto, uma estrada com duas vias tem capacidade suficiente para assegurar a circulação automóvel com comodidade e segurança, durante os próximos vinte anos, em grande parte das estradas que constituem a rede nacional da maior parte dos países europeus. Conclue-se, portanto, que é necessário construir estradas ùnicamente para os veículos automóveis, sem acessos às propriedades marginais e com uma faixa de rodagem com duas vias. Essas estradas deverão ter normalmente cruzamentos de nível, espaçados pelo menos dez quilómetros, que deverão ser projectadas de acordo com os princípios da canalização do tráfego e ter vias de abrandamento para as viragens à direita e à esquerda. Na Califórnia foram já construidos mais de mil quilómetros de estradas deste tipo com pleno sucesso.

Como é óbvio, nem todas as estradas deverão ter as características de auto-estrada, embora com uma ou duas faixas de rodagem.

Com efeito, numa rede de estradas haverá a considerar os itinerários principais, as estradas colectoras e as estradas de serventia local. Consequentemente, deverão ser, em princípio, do tipo auto-estrada os itinerários principais e as estradas colectoras, que correspondem a uma pequena percentagem da rede viária de qualquer país, mas que tem um elevado coeficiente de utilização.

2 — BENEFÍCIOS DAS AUTO-ESTRADAS

Quanto aos benefícios resultantes da construção de uma auto-estrada há a considerar os relativos aos usuários e à comunidade.

2.1 — Os benefícios directos para os usuários são devidos a um menor tempo de percurso e a um menor custo de operação dos veículos (combustível, óleo, pneus, reparações e depreciação). No entanto, há ainda a considerar os benefícios devidos a uma redução do número de acidentes, assim como a uma maior comodidade e conveniência. A comodidade é um dos principais benefícios resultantes da circulação nas auto-estradas, embora seja difícil avaliá-la econòmicamente. Com efeito, numa auto-estrada não existem as dificuldades de circulação que se verificam nas estradas convencionais, devido à utilização destas pelos mais dispares tipos de usuários, o que tem como consequência paragens, assim como manobras difíceis e perigosas que provocam um grande desgaste nervoso.

2.2 — Os benefícios para os usuários também o são para a comunidade. No entanto, há ainda benefícios directos para a comunidade resultantes da construção de uma auto-estrada, como sejam: o grande desenvolvimento económico que esta possibilita na área que serve e a valorização dos terrenos localizados próximo dos nós de ligação; assim como benefícios indirectos resultantes dos correspondentes aos usuários cuja actividade é útil à comunidade (agricultura, indústria, comércio, turismo, etc.), e que portanto poderão diminuir o preço dos seus serviços, ou aumentar os seus lucros.

Como se disse, a construção de auto-estradas foi imposta pela necessidade de se assegurar o tráfego automóvel, pelo que a sua função principal é permitir a circulação de grandes volumes de tráfego com segurança, economia e comodidade, não sendo permitido o acesso às propriedades marginais. No entanto, segundo estudos efectuados nos Estados Unidos, o efeito nas propriedades marginais e da região é de tal ordem, sob os aspectos económicos e sociais, que excede largamente os benefícios imediatos resultantes da construção de uma estrada convencional.

Um outro benefício indirecto resultante da construção de uma auto-estrada é a facilidade

de circulação nas estradas locais, que são descongestionadas devido a uma percentagem elevada do seu tráfego ser desviado para aquela.

Pode portanto dizer-se que o elevado custo de uma auto-estrada é amplamente compensado pelos benefícios que origina.

3 — BENEFÍCIOS RESULTANTES DA CONSTRUÇÃO DA AUTO-ESTRADA DO NORTE

A fim de se determinarem os benefícios para os usuários resultantes da utilização de uma auto-estrada, procedeu-se ao estudo comparativo dos custos de operação, tempo de percurso e acidentes no troço Sacavém–Vila Franca da Auto-Estrada do Norte, e no troço da antiga estrada compreendido entre as mesmas localidades. A Auto-Estrada do Norte ligará no futuro as cidades de Lisboa e Porto, sendo portanto a principal estrada do país. O troço Sacavém–Vila Franca tem a extensão de cerca de 24 quilómetros A velocidade base considerada para a definição das suas características geométricas foi de 140 km/hora, sendo o raio mínimo em planta de 1000 m. e a rampa máxima de 4,5 %.

O traçado da auto-estrada está localizado entre a antiga estrada e o canal de abastecimento de água à cidade de Lisboa, em terrenos de estabilidade precária, o que ocasionou uma série de acidentes geotécnicos que dificultaram bastante o andamento dos trabalhos. Neste troço há ainda a considerar como obras de arte especiais três viadutos, com a extensão total de 994 metros, sendo a do maior de 485 metros. Os nós e a praça de portagem são iluminados, havendo também pórticos com sinais de pré-sinalização iluminados a fim de facilitarem a orientação dos condutores, e portanto assegurar a sua comodidade e segurança. Ao longo da estrada, e localizados nas bermas, há telefones destinados a chamadas de emergência. A fim de se assegurar a segurança e comodidade da circulação a auto-estrada é vedada com rede metálica, e procedeu-se ao arranjo florístico dos nós e à arborização do separador com espécies sub-arbustivas. Ainda com o fim de aumentar a segurança do tráfego foram colocadas guardas, em betão de cimento, nos locais considerados perigosos.

Devido às características especiais desta auto-estrada o seu custo foi elevado assim como o é a sua conservação, pelo que a mesma foi submetida ao regime de portagem, justificada aliás pelas condições de comodidade, rapidez, e segurança que oferece, e pelo facto de continuar em serviço a antiga estrada. Ao fixarem-se as taxas de portagem tiveram-se em consideração os benefícios para o tráfego devidos a um menor custo de operação e tempo de percurso. Consequentemente, o estudo a que se refere esta comunicação permitiu avaliar a exactidão das premissas em que se baseou a fixação das taxas de portagem, e obter elementos objectivos e válidos para qualquer outro troço em idênticas circunstâncias.

3.1 — Descrição Geral do Estudo

Para a determinação do consumo de combustível utilizaram-se quatro veículos da Junta Autónoma de Estradas, dos quais três ligeiros e um pesado, cujas características se indicam no Quadro I. Cada veículo tinha uma equipa constituída pelo condutor e por um operador. O operador tinha por missão preencher o verbate correspondente a cada percurso, no qual anotava os seguintes elementos: hora de partida e chegada aos locais de abastecimento, tempo de percurso entre postos de referência, quilómetros percorridos entre os postos de abastecimento e as referências, número de mudanças de velocidade, travagens, paragens e ultrapassagens.

O operador tinha ainda de ligar e desligar o depósito suplementar ao passar nos postos de referência, nos quais se encontravam os cantoneiros que procediam ao registo do número de matrícula para a determinação do tempo de percurso dos veículos que circulavam na estrada.

O troço considerado na antiga estrada foi o compreendido entre Sacavém e o acesso à Ponte Marechal Carmona, com a extensão de 22.200 metros. Quanto à Auto-Estrada do Norte foi considerado o troço compreedido entre a Praça de Portagem (Sacavém) e o pórtico indicativo da saída para Vila Franca, com a extensão de 21.800 metros.

As determinações do tempo de percurso e do consumo de combustível foram efectuadas na antiga estrada (N.º 10) antes da inauguração da Auto-Estrada do Norte (24 e 26 de Maio de 1961), e dois anos depois nesta e naquela, respectivamente em 28 e 29 de Maio de 1963.

Em cada dia foram considerados quatro períodos horários, dois dos quais correspondentes às horas de ponta (7,30 às 10 e 17 às 19,30) e os dois restantes ao tráfego horário médio (12 às 14,30 e 20 às 21,30).

Em 1961 o tráfego nas horas de ponta na N. 10 foi, em média, de 635 veículos automóveis, sendo o tráfego horário médio de 446, e o tráfego médio diário de 9.375. Em 1960 o tráfego médio diário no troço Sacavém-Vila Franca da N 10 tinha sido de 9.211 veículos automóveis (sendo 37 % veículos comerciais), 1.320 velocípedes e 55 veículos de tracção animal.

No entanto, em Sacavém, o tráfego médio diário na antiga estrada em 1960 foi de 12.215 veículos, o que corresponde à sua capacidade possível. Como é óbvio, as condições de circulação eram inaceitáveis, pois além de perigosas, devido à deficiência das suas características geométricas em traçado e perfil longitudinal, ocasionavam perdas de tempo elevadas devido à percentagem de veículos comerciais (37 %), que associada às dificuldades de ultrapassagem dava origem à formação constante de «comboios».

3.2 — Consumo de combustível

O consumo de combustível é um dos melhores elementos para se compararem econòmicamente os diferentes troços de um sistema rodoviário. Têm sido efectuados muitos estudos sobre o mesmo, principalmente nos Estados Unidos, os quais revelaram a sua inter-relação com o número de mudanças, travagens, paragens e características do traçado. Com efeito, a um menor número de mudanças, travagens e paragens corresponde uma diminuição do consumo de combustível, e mesmo que haja um aumento da velocidade média, a que corresponde um maior consumo, em geral esse aumento é inferior àquela diminuição, pelo que o resultado final se exprime por uma redução do consumo de combustível.

QUADRO I

Características dos veículos utilizados para a determinação do consumo de combustível

Marca	Modelo	Cilindros	Velocidades	Quilometragem em Maio de 1961	Quilometragem em Maio de 1963	Observações
Peugeot	403 (1960)	4	4	40.000	131.000	—
Vauxhall	Cresta (1961)	6	3	10.000	78.000	—
Chevrolet	Biscayne (1959)	6	3	106.000	161.000	O condutor em 1963 não era o mesmo de 1961
Volvo (peso bruto 12.500 kg.)	L 38507 (1960)	6	5	21.000	83.000	Dois eixos e seis rodas

Para a determinação do consumo de combustível utilizou-se um depósito suplementar fixado no lado interior da porta direita da frente, o qual era ligado e desligado pelo operador ao passar nos postos de referência.

No Quadro II indicam-se os consumos médios, tempos médios de percurso e velocidades médias na N 10 antes da inauguração da Auto-Estrada do Norte, e nesta dois anos depois da sua entrada em serviço, assim como as economias em combustível e tempo de percurso resultantes da circulação na Auto-Estrada do Norte. Analisando este quadro verifica-se uma grande discrepância entre as economias em combustível correspondentes ao Vauxhall e ao Chevrolet,

QUADRO II

Consumos, tempos de percurso e velocidades médias na N 10 e na Auto-Estrada do Norte

Veículos	Antiga Estrada (N 10) (24 e 26 / 5 / 961)				Auto-Estrada do Norte (28 / 5 / 963)				Diminuição do consumo e do tempo de percurso na Auto-Estrada do Norte	
	Número de percursos	Consumo médio (litros)	Tempo médio (minutos)	Velocidade média (km / hora	Número de percursos	Consumo médio (litros)	Tempo médio (minutos)	Velocidade média (km / hora)	Combustível	Tempo de percurso
Peugeot	12	2,271 (10,2)	21	63	12	2,039 (9,2)	14	93	10 %	33 %
Vauxhall	14	2,787 (12,6)	22	60	13	2,376 (10,7)	14	93	15 %	36 %
Chevrolet	10	3,002 (13,6)	25	53	15	2,824 (12,7)	14	93	6 %	44 %
Volvo (camião)	14	5,303 (23,9)	31	43	9	4,823 (21,7)	22	59	9 %	29 %